UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA DIN BUCUREŞTI
ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

DEPARTAMENTUL DE ELECTROTEHNICĂ

REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții privind îmbunătățirea performanțelor în reducerea riscului de accidente în instalațiile electrice de joasă tensiune

Contributions to improving performance in reducing the risk of accidents in low voltage electrical installations

Coordonator ştiinţific

Prof. dr. ing. Mihai IORDACHE

Doctorand:

Ing. Adrian Florian GEORGESCU

BUCUREȘTI
2026

MULŢUMIRI

Aș dori să îmi exprim, înainte de toate, profunda apreciere şi sincere mulțumiri domnului Prof. Univ. Dr. Ing. Mihai IORDACHE, al cărui sprijin constant a fost esențial în realizarea acestei teze. Prin îndrumarea, motivația și înțelegerea sa, m-a încurajat permanent să îmi ating obiectivul. Recomandările și sfaturile oferite de-a lungul acestei etape de studiu și cercetare au contribuit semnificativ la finalizarea lucrării în termen.

Exprim cele mai calde mulțumiri doamnei Prof. Univ. Dr. Ing. Marilena STĂNCULESCU, domnului Conf. Dr. Ing. Dragoș NICULAE, As. Dr. Ing. Georgiana ZAINEA, și Dr. Ing. Maria Lavinia BOBARU, care mi-au fost alături în descoperirea complexității și frumuseții acestei teme de cercetare. Încrederea pe care mi-au acordat-o, alături de îndrumările și încurajările constante, au fost deosebit de valoroase în parcursul meu academic.

Mulțumesc, de asemenea, membrilor Școlii Doctorale din cadrul Facultății de Inginerie Electrică a Universității Naționale de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București, pentru sprijinul oferit în diverse etape ale elaborării acestei lucrări. Apreciez profund înțelegerea, susținerea și sfaturile primite pe durata studiilor doctorale.

În final, dar cu aceeași considerație, sunt recunoscător familiei mele pentru sprijinul, răbdarea și înțelegerea necondiționată, care au fost fundamentale în atingerea acestui obiectiv.

Cuprins

Capitolul 1 6

Introducere 6

1.1 Scopul tezei de doctorat 6

1.2 Conținutul tezei de doctorat 6

Capitolul 2 8

Stadiul actual al cercetării și reglementărilor în domeniul instalațiilor electrice de joasă tensiune 8

Capitolul 3 11

Analiza riscurilor și a factorilor determinanți în instalațiile electrice de joasă tensiune 11

Concluzii 14

Capitolul 4 14

Scheme și sisteme de alimentare în infrastructurile medicale 14

Concluzii parțiale 18

Capitolul 5 18

Criterii și politici pentru modernizarea instalațiilor electrice de joasă tensiune 18

Concluzii 22

Capitolul 6 22

Sistem de monitorizare termică pentru tablourile electrice 22

Concluzii 28

Capitolul 7 28

Adaptarea impedanței în liniile de transmisie a semnalelor 28

Capitolul 8 35

Generarea parametrilor cuadripolilor și filtrelor analogice 35

Capitolul 9 54

Analiza motorului de inducție în regim sinusoidal periodic, luând în considerare caracteristica de magnetizare și variația rezistenței rotorului în funcție de alunecare 54

Capitolul 10 64

Concluzii generale și direcții viitoare de cercetare 64

10.1. Lista lucrărilor publicate 65

10.2. Impactul științific și aplicativ 66

Bibliografie 67

Lista tabelelor

TABELUL 2.1. PRINCIPALELE REGLEMENTĂRI ÎN DOMENIUL INSTALAȚIILOR ELECTRICE. [24-29] 10
TABELUL 3.1. CLASIFICAREA TIPURILOR DE RISCURI IN INSTALAȚIILE DE JOASA TENSIUNE. .. 11
TABELUL 3.2. ÎMBĂTRÂNIREA IZOLAȚIEI ODATĂ CU CREȘTEREA TEMPERATURII 13
TABELUL 3.3. NIVELUL DE RISC ASOCIAT CU CREȘTEREA TEMPERATURII. 13
TABELUL 4.1. CLASIFICAREA SPAȚIILOR MEDICALE CONFORM I7/2011 ȘI SR HD 60364-7-710. 15
TABELUL 4.2. CORELAȚIA INTRE TIPUL DE SCHEMA ȘI NIVELUL DE RISC ESTIMAT. 17
TABELUL 5.1. DURATA DE VIAȚA ORIENTATIVA A COMPONENTELOR INSTALAȚIILOR ELECTRICE. 19
TABELUL 6.1. COMPONENTELE UTILIZATE ÎN EXPERIMENTUL DE MONITORIZARE TERMICĂ. .. 23
TABELUL 6.2. PRAGURI DE TEMPERATURĂ PENTRU SISTEMUL DE MONITORIZARE. 25
TABELUL 8.1. RELAȚII ÎNTRE PARAMETRII CIRCUITELOR ANALOGICE BIPORT 41
TABELUL 9.1. REZULTATELE OBȚINUTE 57

Lista figurilor

FIG. 2.1. LISTA INCIDENTE PRODUSE IN UNITATI SPITALICESTI. 8
FIG. 2.2. EXEMPLE DE TABLOURI ELECTRICE DIN SPITALE INAINTE ȘI DUPA MODERNIZARE. 9
FIG. 2.3. EXEMPLE DE CABLURI SUBDIMENSIONATE ȘI TABLOURI CU CONEXIUNI DETERIORATE. 9
FIG. 3.1. EXEMPLE VIZUALE DE DEFICIENȚE : CONEXIUNI OXIDATE, CABLURI INCALZITE, IMPROVIZAȚII. 12
FIG. 4.1. SCHEMA GENERALĂ DE ALIMENTARE A UNUI SPITAL: SURSĂ PRINCIPALĂ, GRUP ELECTROGEN. 16
FIG. 4.2. EXEMPLU DE SCHEMA IT MEDICALA PENTRU O SALA DE OPERAȚIE (SCHNEIDER ELECTRIC). 17
FIG. 5.1. COMPARAȚIE VIZUALĂ ÎNTRE UN TABLOU ELECTRIC VECHI ȘI UNUL MODERN ECHIPAT CU PROTECȚII DIFERENȚIALE ȘI SENZORISTICĂ. 19
FIG. 5.2. EXEMPLE DE DEFICIENȚE VIZIBILE IN INSTALAȚIILE VECHI. 20
FIG. 5.3. SCHEMA LOGICĂ A UNEI INSTALAȚII ELECTRICE SIGURE. 21
FIG. 5.4. EXEMPLU DE MASURATOARE CU CAMERA DE TERMOVIZIUNE INTR-UN TABLOU ELECTRIC. 22
FIG. 6.1. A) SCHEMA MONOFILARA A TABLOULUI ELECTRIC ; B) SCHEMA SISTEMULUI DE MONITORIZARE TERMICA ARDUINO SI C) FOTOGRAFII DIN TIMPUL EXPERIMENTULUI. 25
FIG. 6.2. GRAFICUL TEMPERATURII IN FUNCȚIE DE TIMP PENTRU DIFERITE SARCINI. 26
FIG. 6.3. CURBA DE DEGRADARE A IZOLAȚIEI PVC ÎN FUNCȚIE DE TEMPERATURĂ (MODEL ARRHENIUS). 27
FIG. 6.4. CONCEPTUL UNUI SISTEM DE MONITORIZARE EXTINS (IOT + CLOUD). 28
FIG. 7.3. SURSA ȘI IMPEDANȚA CIRCUITULUI DE SARCINĂ. 29
FIG. 7.1. PIERDEREA DE RETUR ȘI PIERDEREA DE INSERȚIE INTR-UN CIRCUIT FARA PIERDERI SAU O LINIE DE TRANSMISIE. 30
FIG. 7.2. MODELAREA UNUI CIRCUIT DE MICROUNDE CU DOUĂ PORTURI UTILIZÂND PARAMETRII *S*. 30
FIG. 7.5. REȚELE DE TIP *L* PENTRU ADAPTAREA IMPEDANȚEI UNEI SURSE SAU A UNEI SARCINI LA O LINIE DE TRANSMISIE CU IMPEDANȚA CARACTERISTICĂ $Z0$ 31

FIG. 7.7. ADAPTAREA UNEI SARCINI PUR REZISTIVE FOLOSIND O LINIE DE TRANSMISIE DE LUNGIME Λ/4. 31
FIG. 7.14**.** ADAPTAREA UNEI SARCINI PUR REZISTIVE FOLOSIND UN TRONSON DE LINIE DE LUNGIME Λ/4. 32
FIG. 7.8. LINIE DE TRANSMISIE FARA PIERDERI, TERMINATA PE O SARCINA ARBITRARA DE IMPEDANȚA *ZL*, ADAPTATA PRIN INTERMEDIUL A DOUA ELEMENTE PUR REACTIVE. 32
FIG. 7.10. ADAPTAREA IMPEDANȚEI PRIN INTERMEDIUL UNEI REȚELE REACTIVE DE ADAPTARE CU TOPOLOGIE SERIE–PARALEL (JX_1 SERIE CU Z_L ȘI IN PARALEL CU JX_2). 33
FIG. 7.26. CONFIGURAȚII POSIBILE PENTRU ADAPTAREA IMPEDANȚEI. 34
FIG. 8.1. REPREZENTAREA SCHEMATICĂ A UNUI CUADRIPOL LINIAR PASIV. 35
FIG. 8.2. CIRCUIT UTILIZAT PENTRU DEFINIREA PARAMETRILOR *S*. 39
FIG. 8.3. DEFINIREA CELOR PATRU TIPURI DE SURSE COMANDATE. 40
FIG. 8.4, A. DEFINIREA IMPEDANȚEI DE INTRARE $Z_{II}(S)$. 40
FIG. 8.4, B. DEFINIREA ADMITANȚEI DE INTRARE $Y_{II}(S)$. 40
FIG. 8.5. FEREASTRĂ DE UTILIZARE A PROGRAMULUI CSAP. 41
FIG. 8.6. FEREASTRA DE UTILIZARE A PROGRAMULUI TFSYG . 41
FIG. 8.7. FILTRU TRECE-BANDA DE TIP *M*. 44
FIG. 8.8. VARIAȚIILE CU FRECVENȚA ALE MODULELOR PARAMETRILOR *S* ȘI ALE RANDAMENTELOR DE TRANSMITERE A SEMNALELOR PENTRU FILTRUL DIN FIGURA 8.7: A) MODULELE EXPRIMATE ÎN [DB]; B) MODULELE EXPRIMATE ÎN [%/%]; C) ARGUMENTELE PARAMETRILOR *S*; D) RANDAMENTELE DE TRANSMITERE A SEMNALELOR DE LA INTRARE LA IEȘIRE H_{21_S21} ȘI DE LA IEȘIRE LA INTRARE H_{12_S12}. 46
FIG. 8.9. VARIAȚIILE CU FRECVENȚA ALE MODULELOR: A) ABS($Z_{I1\text{-}F}$)-BLUE, ABS($Z_{I2\text{-}F}$)-MAGENTAP, ABS($Z_{C1\text{-}F}$)-GREEN ȘI ABS($Z_{C2\text{-}F}$)-REDP; B) 20.0*LOG10(ABS($Z_{I1\text{-}F}$))-BLUE, 20.0*LOG10(ABS($Z_{I2\text{-}F}$))-MAGENTAP, 20.0*LOG10(ABS($Z_{C1\text{-}F}$))-GREEN ȘI 20.0*LOG10(ABS($Z_{C2\text{-}F}$)). 47
FIG. 8.10. VARIAȚIILE CU FRECVENȚA ALE: A) CONSTANTEI DE ATENUARE; B) CONSTANTEI DE FAZA. 48
FIG. 8.11. FILTRU TRECE BANDA DE TIP *M*. 48
FIG. 8.12. VARIAȚIILE CU FRECVENȚA ALE MODULELOR PARAMETRILOR *S* ȘI ALE RANDAMENTELOR DE TRANSMITERE A SEMNALELOR PENTRU FILTRUL DIN FIGURA 8.11: A) MODULELE EXPRIMATE ÎN [DB]; B) MODULELE EXPRIMATE ÎN [%/%]; C) ARGUMENTELE PARAMETRILOR *S*; D) RANDAMENTELE DE TRANSMITERE A SEMNALELOR DE LA INTRARE LA IEȘIRE H_{21_S21} ȘI DE LA IEȘIRE LA INTRARE H_{12_S12}. 51
FIG. 8.13. VARIAȚIILE CU FRECVENȚA ALE MODULELOR: A) ABS($Z_{I1\text{-}F}$)-BLUE, ABS($Z_{I2\text{-}F}$)-MAGENTAP, ABS($Z_{C1\text{-}F}$)-GREEN ȘI ABS($Z_{C2\text{-}F}$)-REDP; B) 20.0*LOG10(ABS($Z_{I1\text{-}F}$))-BLUE, 20.0*LOG10(ABS($Z_{I2\text{-}F}$))-MAGENTAP, 20.0*LOG10(ABS($Z_{C1\text{-}F}$))-GREEN ȘI 20.0*LOG10(ABS($Z_{C2\text{-}F}$)). 52
FIG. 8.14. CARACTERISTICILE DE FRECVENȚĂ ALE FILTRULUI TRECE BANDĂ DE TIPUL M DIN FIGURA 8.11, ASTFEL: VARIAȚIA CU FRECVENȚA A MODULULUI FACTORULUI DE TRANSFER (AMPLIFICARE) ÎN TENSIUNE ABS(AFTB_M) EXPRIMAT ÎN [DB] – FIGURA 8.14, A ȘI, RESPECTIV EXPRIMAT ÎN [V/V] ÎN FIGURA 8.14, B. 53
FIG. 8.16. CARACTERISTICILE BODE ALE FILTRULUI TRECE BANDĂ DIN FIGURA 8.11, DUPĂ CUM URMEAZĂ: A) DIAGRAMA BODE; B) DIAGRAMA NYQUIST; C) REPREZENTAREA POLILOR ȘI ZEROURILOR ÎN PLANUL COMPLEX ȘI D) POLII ȘI ZEROURILE PENTRU A_{FTB_M}. 54
FIG. 9.1. SCHEMA ECHIVALENTĂ ÎN *Π* A MOTORULUI DE INDUCȚIE 55
FIG. 9.2. A) CARACTERISTICA $\varphi_{LM}(I_{LM}) = \varphi_{L6}(I_{L6})$Ș B) CARACTERISTICA $R_2(T)$. 56
FIG. 9.3. SIMULAREA ÎN SPICE A BOBINELOR NELINIARE CONTROLATE ÎN CURENT. 57

Capitolul 1
Introducere

1.1 Scopul tezei de doctorat

Într-un context global în care siguranța instalațiilor electrice reprezintă o componentă esențială a infrastructurilor moderne, analiza, evaluarea și reducerea riscului de accidente în sistemele de joasă tensiune devin priorități majore atât pentru specialiștii în domeniu, cât și pentru instituțiile care reglementează acest sector [4], [6], [8]. În România, o parte semnificativă a fondului construit dispune de instalații electrice învechite, subdimensionate sau necorespunzător întreținute, ceea ce conduce la o creștere constantă a incidentelor generate de defecțiuni electrice — incendii, electrocutări, întreruperi în alimentare sau degradări ale echipamentelor [5], [7], [23].

Aceste fenomene au un impact direct asupra siguranței utilizatorilor, a durabilității construcțiilor și a continuității serviciilor publice, în special în unități sensibile precum spitalele, școlile sau clădirile administrative [3], [5]. În acest context, tema tezei de doctorat intitulată **„Contribuții privind îmbunătățirea performanțelor în reducerea riscului de accidente în instalațiile electrice de joasă tensiune”** se înscrie într-o direcție de cercetare actuală și de interes strategic național și european, având ca obiectiv principal **creșterea nivelului de siguranță și fiabilitate al instalațiilor electrice** printr-o combinație între analiză teoretică, studii aplicative și soluții tehnologice inovatoare [1], [7], [23].

1.2 Conținutul tezei de doctorat

Teza este structurată în zece capitole principale, care reflectă logica progresivă a cercetării:

Capitolul 1 – Introducere : Instalațiile electrice de joasă tensiune, deși aparent simple în concepție, sunt sisteme complexe, aflate în permanentă interacțiune cu factorii de mediu și cu cerințele variabile ale consumatorilor ;

Capitolul 2 – Stadiul actual al cercetării și reglementărilor în domeniul instalațiilor electrice de joasă tensiune: Instalațiile electrice de joasă tensiune reprezintă infrastructura vitală a oricărui spațiu construit modern;

Capitolul 3 – Analiza riscurilor și a factorilor determinanți în instalațiile electrice de joasă tensiune: Riscul în instalațiile electrice de joasă tensiune este o realitate complexă și multidimensională, rezultată din interacțiunea dintre elemente tehnice, umane și organizaționale;

Capitolul 4 – Scheme și sisteme de alimentare în infrastructurile medicale: Unitățile medicale reprezintă una dintre cele mai sensibile categorii de infrastructuri electrice, deoarece funcționarea neîntreruptă a sistemelor de alimentare poate face diferența între viață și moarte.

Capitolul 5 - Criterii și politici pentru modernizarea instalațiilor electrice de joasă tensiune: Orice instalație electrică are o durată de viață limitată, influențată de calitatea materialelor, de condițiile de exploatare și de nivelul de întreținere.

Capitolul 6 - Sistem de monitorizare termică pentru tablourile electrice : Creșterea temperaturii în componentele instalațiilor electrice este unul dintre cei mai importanți indicatori ai riscului de defect și incendiu.

Capitolul 7 - Adaptarea impedanței în liniile de transmisie a semnalelor : *Adaptarea impedanțelor și a rețelelor de transmisie a semnalelor* este esențială pentru transmiterea eficientă a energiei între surse și sarcini în sistemele de comunicație, audio, radiofrecvență (RF), microelectronice și alte domenii tehnice.

Capitolul 8 - Generarea parametrilor cuadripolilor și filtrelor analogice : Pentru a caracteriza circuitele biport liniare, în regim armonic, se folosesc, la frecvențe joase și medii, parametrii : Z, Y, H, T, F etc**.**

Capitolul 9 - Analiza motorului de inducție în regim periodic sinusoidal, luând în considerare caracteristica de magnetizare și variația rezistenței rotorice în funcție de alunecare : Studierea regimului periodic nesinusoidal prezintă importanță atât din perspectiva efectelor perturbatoare produse în rețelele de transport și distribuție a energiei electrice, cât și din punctul de vedere al utilizării acestuia în construcția unor dispozitive electrice.

Capitolul 10 - Concluzii și perspective : sintetizează rezultatele obținute în cadrul cercetării, evidențiază contribuțiile originale ale autorului și propune direcții viitoare de cercetare.

Capitolul 2

Stadiul actual al cercetării și reglementărilor în domeniul instalațiilor electrice de joasă tensiune

Instalațiile electrice de joasă tensiune reprezintă o componentă esențială a clădirilor civile, industriale și medicale, deoarece asigură alimentarea tuturor echipamentelor necesare funcționării normale a acestora: iluminat, climatizare, echipamente tehnologice, sisteme informatice, aparatură medicală, instalații de siguranță și sisteme de monitorizare [3], [4]. Din acest motiv, siguranța instalației electrice influențează direct siguranța persoanelor, continuitatea activității și protecția clădirii împotriva incendiilor sau avariilor.

În ultimii ani, incidentele produse în clădiri publice și în special în unități spitalicești au arătat că instalațiile electrice vechi, modificate repetat sau întreținute necorespunzător pot deveni surse majore de risc. În publicația privind reducerea riscurilor la clădirile unităților spitalicești sunt prezentate numeroase cazuri de incendii și evacuări produse în spitale, inclusiv în secții ATI, blocuri operatorii, saloane sau unități mobile medicale. Exemple precum incendiile de la Maternitatea Giulești, Spitalul Județean Piatra-Neamț, Institutul „Matei Balș”, Spitalul de Boli Infecțioase Constanța sau Spitalul suport COVID Movila evidențiază consecințele grave pe care le poate avea un defect tehnic într-o infrastructură medicală critică [23]. În aceeași publicație se subliniază că, în multe situații, incendiile și accidentele analizate au avut legătură directă sau indirectă cu instalațiile electrice, prin defecțiuni, improvizații, suprasarcini, cabluri vechi, tablouri depășite tehnic sau lipsa unei mentenanțe adecvate [23].



Fig. 2.1. Lista incidente produse in unitati spitalicesti.

Un motiv important al cercetării îl reprezintă faptul că, potrivit informațiilor analizate în studiile de caz

și în rapoartele privind incendiile produse în clădiri, o parte semnificativă a incendiilor raportate are la bază defecțiuni ale instalațiilor electrice sau exploatarea necorespunzătoare a acestora. În cazul spitalelor, riscul este amplificat deoarece alimentarea cu energie electrică susține echipamente vitale, precum aparatura ATI, sistemele de oxigen, aparatele de anestezie, sistemele de monitorizare a pacienților, iluminatul de siguranță și sistemele de ventilație. O întrerupere, o suprasarcină sau un incendiu într-un tablou electric poate afecta direct actul medical și poate impune evacuarea pacienților.



Fig. 2.2. Exemple de tablouri electrice din spitale înainte și după modernizare.

Studiile de caz analizate au evidențiat mai multe deficiențe tehnice repetate în instalațiile electrice existente. Cele mai frecvente sunt: neconcordanța dintre valoarea protecției și secțiunea cablului, alimentarea unor consumatori noi din tablouri existente fără recalcularea sarcinilor, lipsa protecțiilor diferențiale, lipsa protecțiilor la supratensiune, conexiunile deteriorate, tablourile electrice vechi, lipsa etichetării circuitelor și lipsa documentației tehnice actualizate [5], [23]. O situație frecvent întâlnită este montarea unor siguranțe de valori mari pe circuite cu secțiuni de cablu reduse, ceea ce conduce la supraîncălzirea conductoarelor și la creșterea riscului de incendiu [4], [6], [16], [23].

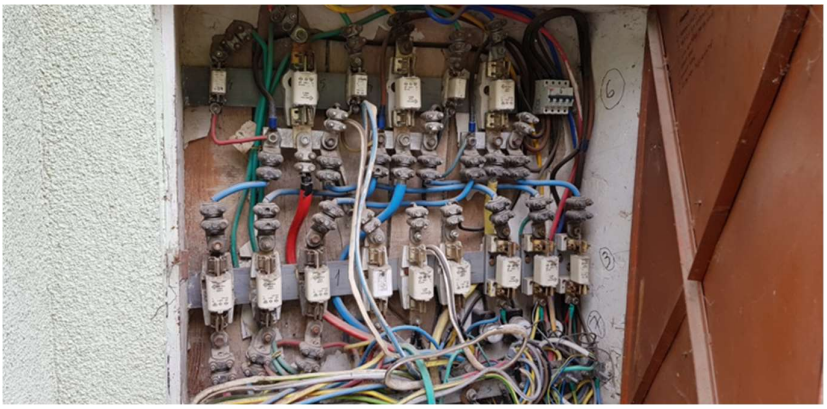


Fig. 2.3. Exemple de cabluri subdimensionate și tablouri cu conexiuni deteriorate.

O altă problemă majoră este apariția unor consumatori noi, cu puteri electrice ridicate, conectați la instalații proiectate pentru cerințe mult mai reduse. În spitale, această situație apare prin introducerea aparaturii medicale moderne, precum RMN, CT, RX, sisteme de climatizare, echipamente ATI și aparate de sterilizare. În clădirile civile și industriale, situații similare apar prin instalarea sistemelor de

aer condiționat, mașinilor electrice, echipamentelor IT, utilajelor cu comandă numerică sau panourilor fotovoltaice [23]. Dacă aceste modificări nu sunt însoțite de recalcularea puterii instalate, verificarea cablurilor, verificarea protecțiilor și actualizarea schemei monofilare, instalația poate funcționa în regim de suprasarcină fără ca riscul să fie imediat observabil.

Siguranța instalațiilor electrice este reglementată printr-un cadru normativ amplu, care include normative tehnice, standarde europene și acte legislative. Cele mai importante documente sunt I7/2011, NP015/2022, SR HD 60364, NP061/2002, P118/2015, Legea 319/2006, Legea 123/2012 și Ordinul ANRE 59/2013 [3], [4], [6]–[11], [16], [17], [24]–[29]. Aceste documente stabilesc cerințe privind proiectarea, execuția, verificarea, protecția împotriva electrocutării, siguranța la incendiu, alimentarea consumatorilor critici și autorizarea personalului de specialitate.

Tabelul 2.1. Principalele reglementări în domeniul instalațiilor electrice. [24-29]

Nr. crt.	**Cod / Denumire normativă**	**Domeniu de aplicare**
1	I7/2011	Normativ pentru proiectarea și executarea instalațiilor electrice aferente clădirilor civile și industriale
2	NP015/2022	Normativ pentru proiectarea și verificarea instalațiilor electrice în unități sanitare
3	SR HD 60364	Standard european privind instalațiile electrice de joasă tensiune
4	NP061/2002	Normativ privind protecția împotriva electrocutărilor
5	P118/2015	Normativ de siguranță la incendiu a construcțiilor
6	Legea 319/2006	Legea securității și sănătății în muncă
7	Legea 123/2012	Legea energiei electrice și a gazelor naturale
8	Ordin ANRE 59/2013	Regulament privind autorizarea electricienilor și firmelor de execuție

Totuși, existența unui cadru normativ amplu nu garantează automat siguranța instalațiilor. Aplicarea corectă a normativelor este dificilă în practică, deoarece legislația este complexă, iar instalațiile existente au fost adesea modificate în timp fără documentație completă. Din acest motiv, siguranța nu trebuie să se bazeze doar pe interpretarea individuală a normelor, ci pe respectarea etapelor obligatorii: proiectare, execuție, verificare, mentenanță și actualizarea documentației tehnice.

În cazul unităților medicale, această cerință devine esențială. Normativele prevăd încadrarea încăperilor medicale în grupe de siguranță, utilizarea surselor de rezervă, alimentarea consumatorilor critici, existența tablourilor IT medicale pentru sălile de operație și ATI și limitarea duratelor de întrerupere a alimentării [3], [24]. Cu toate acestea, studiile de caz au arătat că multe instalații spitalicești nu mai corespund cerințelor actuale, deoarece au fost modificate în timp, au fost suprasolicitate de consumatori noi sau nu au beneficiat de mentenanță tehnică suficientă [5], [23].

Direcțiile actuale de cercetare urmăresc completarea verificărilor clasice cu metode moderne de diagnosticare și monitorizare. Printre acestea se află analiza termografică, monitorizarea curenților și tensiunilor în timp real, analiza armonicilor, utilizarea senzorilor de temperatură în tablouri electrice, folosirea microcontrolerelor și dezvoltarea sistemelor de mentenanță predictivă [1], [7], [19], [20], [21], [22]. Aceste soluții permit identificarea defectelor incipiente înainte ca acestea să producă incendii, întreruperi sau accidente.

Prin urmare, stadiul actual al cercetării arată că instalațiile electrice de joasă tensiune trebuie evaluate nu doar prin verificări periodice, ci printr-un sistem integrat de analiză, monitorizare și mentenanță. În special în clădirile vechi și în unitățile spitalicești, siguranța instalației depinde de corelarea dintre documentația tehnică, starea reală din teren, sarcinile actuale, protecțiile existente și monitorizarea permanentă a tablourilor electrice.

Concluzii

Analiza stadiului actual arată că instalațiile electrice de joasă tensiune, în special cele vechi sau modificate succesiv, pot deveni surse importante de risc. Incidentele produse în spitale confirmă faptul că defecțiunile electrice, suprasarcinile, improvizațiile și lipsa mentenanței pot avea consecințe grave. Deși cadrul normativ este amplu, siguranța reală depinde de aplicarea corectă a acestuia, de actualizarea documentației, de modernizarea instalațiilor și de monitorizarea continuă a tablourilor electrice.

Capitolul 3

Analiza riscurilor și a factorilor determinanți în instalațiile electrice de joasă tensiune

Riscul în instalațiile electrice de joasă tensiune este determinat de interacțiunea dintre factori tehnici, umani, organizaționali și de mediu [1], [4], [7], [27]. Pe măsură ce instalația îmbătrânește, materialele își pierd proprietățile inițiale, izolațiile se degradează, contactele se oxidează, iar tablourile electrice devin tot mai dificil de exploatat și verificat. În același timp, creșterea numărului de consumatori și modificările succesive asupra instalației pot conduce la suprasarcini, încălziri locale și funcționare în condiții nesigure [5], [7], [11], [23].

În instalațiile electrice, riscul poate fi definit ca produs între probabilitatea apariției unui eveniment nedorit și severitatea consecințelor acestuia [1], [7]. Evenimentele nedorite pot include electrocutarea, incendiul, întreruperea alimentării, degradarea echipamentelor sau pierderile economice. Din acest motiv, evaluarea riscului nu trebuie să se limiteze doar la măsurarea unor parametri electrici, ci trebuie să includă și analiza stării fizice a instalației, istoricul intervențiilor, nivelul de mentenanță, mediul de funcționare și competența personalului care intervine asupra instalației [7], [23], [27].

Tabelul 3.1. Clasificarea tipurilor de riscuri în instalațiile de joasă tensiune.

Categoria de risc	**Descriere**	**Exemple tipice**
Riscuri electrice directe	Determinate de contactul direct sau indirect cu părți aflate sub tensiune	Electrocutare, arsuri, fibrilație ventriculară
Riscuri termice	Generate de supraîncălzirea conductoarelor și conexiunilor	Incendii în tablouri electrice, topirea izolației

Categoria de risc	**Descriere**	**Exemple tipice**
Riscuri mecanice	Deteriorări structurale ale componentelor	Ruperea cablurilor, slăbirea conexiunilor, vibrații
Riscuri funcționale	Asociate pierderii alimentării sau variației tensiunii	Oprirea echipamentelor medicale, defectarea serverelor
Riscuri organizaționale	Derivate din lipsa instruirii, a documentației sau a planurilor de mentenanță	Intervenții neautorizate, utilizarea improvizațiilor
Riscuri de mediu	Factori externi care accelerează degradarea instalațiilor	Umiditate, praf, gaze corozive, temperaturi extreme

Această clasificare permite o abordare sistematică a riscurilor, oferind o bază pentru identificarea măsurilor specifice de reducere și prevenție [1], [7], [23].

Studiile de caz analizate în cadrul cercetării au evidențiat mai multe cauze repetitive ale riscului: îmbătrânirea instalațiilor, suprasarcina, subdimensionarea conductoarelor, mentenanța deficitară, execuția neconformă, intervențiile neautorizate, necunoașterea normativelor și lipsa planurilor de modernizare [5], [7], [23]. Aceste cauze sunt frecvente în clădirile vechi, dar devin mult mai periculoase în infrastructurile critice, cum sunt spitalele, aeroporturile, centrele de date sau unitățile industriale, unde întreruperea alimentării poate produce consecințe severe [3], [5], [24], [28].

În figura 3.1. este prezentată schema unui tablou electric vechi, cu siguranțe fuzibile, conductoare dispuse neordonat și conexiuni dificil de verificat, indicând necesitatea modernizării instalației.

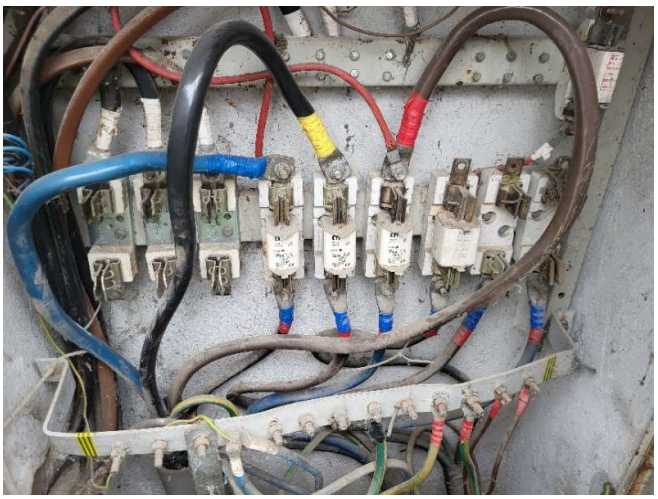


Fig. 3.1. Exemple vizuale de deficiențe : conexiuni oxidate, cabluri încălzite, improvizații.

Aceste cauze se regăsesc în majoritatea clădirilor vechi din România, dar sunt cu atât mai periculoase în **infrastructurile critice** (spitale, aeroporturi, fabrici, centre de date), unde întreruperea alimentării are consecințe severe [3], [5], [24], [28].

Pentru evaluarea sistematică a riscului, teza propune un model simplu și aplicabil în practică, bazat pe relația:

$$R = P \times S$$

unde:

- **R** – nivelul de risc;
- **P** – probabilitatea de apariție a evenimentului (defectului) ;
- **S** – severitatea consecinței.

Prin atribuirea unui scor numeric pentru probabilitate și severitate, riscul poate fi clasificat în trei niveluri: risc scăzut, risc moderat și risc ridicat. Această abordare permite prioritizarea intervențiilor, astfel încât instalațiile sau componentele cu risc ridicat să fie remediate cu prioritate.

Un element important al capitolului este corelarea riscului electric cu riscul termic. Supraîncălzirea conductoarelor, bornelor și conexiunilor este unul dintre cei mai importanți indicatori ai apariției unui defect. Creșterea temperaturii accelerează îmbătrânirea izolației și poate conduce la topirea acesteia, apariția arcurilor electrice și incendii [1], [7], [23]. În acest sens, temperatura devine un indicator predictiv al riscului electric.

Tabelul 3.2. Îmbătrânirea izolației odată cu creșterea temperaturii

Îmbătrânirea izolației odată cu creșterea temperaturii	
Temperatura (°C)	Factor de accelerare a îmbătrânirii izolației
25	1
35	5
45	15
60	100
80	638

Aplicarea acestui model permite prioritizarea intervențiilor și planificarea reparațiilor sau înlocuirilor [1], [7], [23].

Tabelul 3.3. Nivelul de risc asociat cu creșterea temperaturii.

Nivelul de risc asociat cu creșterea temperaturii		
Interval de temperatură (°C)	Nivel de risc	Descriere
0-40	Scăzut	Condiții normale de funcționare
40-70	Mediu	Temperatura peste limita normala, risc de degradare
70-90	Ridicat	Temperatura aproape de limita critica, risc mare de incendiu
>90	Extrem	Temperatura critica, risc iminent de incendiu

Metodologia propusă pentru evaluarea riscului include șase etape: colectarea datelor, evaluarea conformității normative, evaluarea stării fizice, determinarea riscului total, propunerea măsurilor de remediere și reevaluarea periodică [4], [7], [10], [11], [23]. Această metodologie permite trecerea de la o verificare punctuală la o analiză continuă și predictivă a instalației electrice. Ea se bazează pe documentație tehnică, măsurători PRAM, inspecție vizuală, date termografice și monitorizarea parametrilor în timp.

Concluzii

În concluzie, Capitolul 3 arată că riscul în instalațiile electrice de joasă tensiune nu este produs de un singur factor, ci de acumularea mai multor cauze: vechime, suprasarcină, execuție neconformă, lipsa mentenanței, intervenții neautorizate și condiții de mediu nefavorabile. Modelul (R = P S), împreună cu analiza temperaturii, oferă o metodă practică de identificare și prioritizare a riscurilor. Rezultă că monitorizarea termică a tablourilor electrice poate deveni un instrument important pentru prevenirea incendiilor și pentru trecerea de la mentenanța reactivă la mentenanța predictivă.

Capitolul 4

Scheme și sisteme de alimentare în infrastructurile medicale

Unitățile medicale reprezintă infrastructuri critice, deoarece continuitatea alimentării cu energie electrică influențează direct siguranța pacienților și funcționarea actului medical [3], [5], [24]. Sălile de operație, secțiile ATI, laboratoarele de imagistică, aparatele de diagnostic, sistemele de monitorizare și echipamentele de susținere a vieții necesită o alimentare stabilă, sigură și permanentă [3], [24]. În acest context, proiectarea instalațiilor electrice din spitale trebuie tratată diferit față de clădirile obișnuite, deoarece întreruperea alimentării, apariția unui defect de izolație sau supraîncălzirea unui tablou electric pot avea consecințe grave.

Incidentele produse în spitalele din România, precum cele de la Spitalul Județean Piatra Neamț, Institutul „Matei Balș” și Spitalul de Boli Infecțioase Constanța, au evidențiat vulnerabilitatea infrastructurilor medicale în fața defecțiunilor electrice, supraîncălzirilor, improvizațiilor și lipsei unei mentenanțe corespunzătoare [5], [23], [26]. Din acest motiv, capitolul analizează principalele scheme de alimentare utilizate în spitale, cerințele normative și măsurile prin care riscul electric poate fi redus.

Proiectarea instalațiilor electrice medicale este reglementată prin NP015/2022, I7/2011, SR HD 60364-7-710:2012, SR EN 12464-1, Ordinul Ministrului Sănătății nr. 914/2006 și Legea 10/1995 [3], [4], [24], [30], [31]. Aceste reglementări impun condiții stricte privind continuitatea alimentării, protecția împotriva electrocutării și incendiilor, selectivitatea protecțiilor, redundanța circuitelor și alimentarea separată a consumatorilor critici [3], [4], [8], [24]–[26].

Tabelul 4.1. Clasificarea spațiilor medicale conform I7/2011 și SR HD 60364-7-710.

Grupă	**Descriere**	**Exemple**	**Cerințe de siguranță**
Grupa 0	Spații unde nu se utilizează echipamente conectate direct la pacient	cabinete administrative, farmacii	alimentare normală, protecții clasice
Grupa 1	Spații unde echipamentele pot fi conectate la pacient, dar fără risc vital	saloane, săli de tratament	protecție diferențială, alimentare de rezervă
Grupa 2	Spații unde echipamentele sunt esențiale pentru menținerea vieții	săli de operație, ATI	rețea IT medicală, surse de rezervă automate

Această clasificare determină nivelul de protecție, tipul de alimentare și cerințele privind echipamentele de siguranță care trebuie utilizate [3], [24].

Pentru asigurarea continuității alimentării, spitalele trebuie prevăzute cu sursă principală, sursă de rezervă și sursă de siguranță [3], [4], [24]. Sursa principală este asigurată de rețeaua publică, sursa de rezervă este realizată de regulă prin grup electrogen cu pornire automată, iar sursa de siguranță este asigurată prin UPS sau baterii dedicate echipamentelor critice [3], [24], [28]. Timpul maxim admis de întrerupere diferă în funcție de importanța consumatorului, putând varia de la 0,5 secunde la 15 secunde [3], [24].

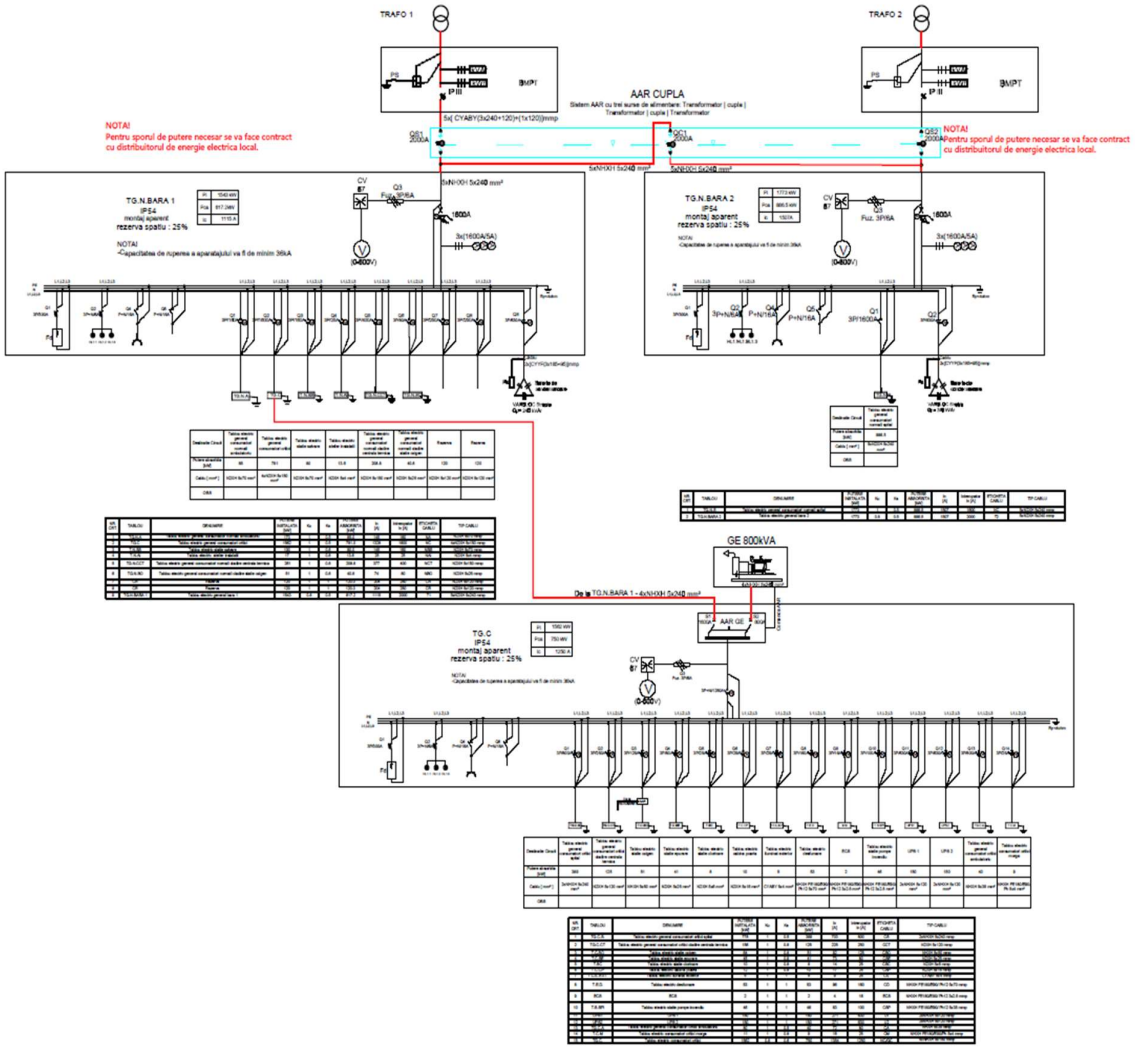


Fig. 4.1. Schema generală de alimentare a unui spital: sursă principală, grup electrogen.

Capitolul prezintă trei tipuri principale de scheme de alimentare: schema radială simplă, schema radială cu rezervă automată și schema buclată [3], [4], [24]. Schema radială simplă este ușor de realizat, dar are risc ridicat deoarece nu oferă redundanță. Schema cu rezervă automată permite comutarea între două surse și este recomandată pentru spitale mai mari. Schema buclată oferă un nivel superior de siguranță, deoarece permite alimentarea prin trasee alternative și izolarea zonelor defecte fără întreruperea totală a alimentării [3], [24].

Pentru spațiile medicale din grupa 2, soluția esențială este rețeaua IT medicală. Aceasta permite funcționarea instalației chiar și la apariția primului defect de izolație, defect care este semnalizat optic și acustic printr-un dispozitiv de supraveghere a izolației [3], [24], [25]. Rețeaua IT medicală reduce curenții de scurgere, asigură izolare galvanică și permite continuitatea alimentării în zonele în care oprirea echipamentelor poate pune în pericol viața pacientului.

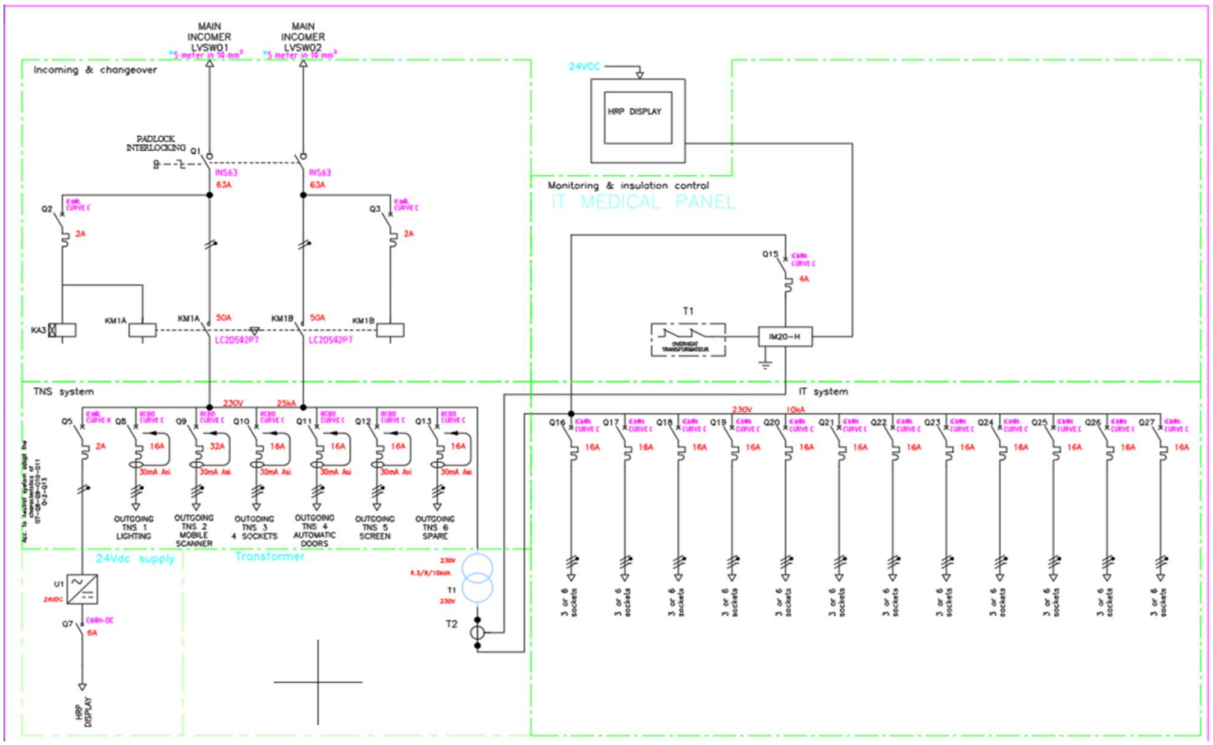


Fig. 4.2. Exemplu de schemă IT medicală pentru o sală de operație (Schneider Electric).

Pentru reducerea riscului, capitolul propune mai multe măsuri: proiectarea de către echipe specializate, verificarea documentațiilor de către terți independenți, mentenanța periodică, verificările termografice, testarea grupurilor electrogene și UPS-urilor, monitorizarea temperaturilor și curenților în tablouri, instruirea personalului și utilizarea echipamentelor certificate pentru uz medical [3], [4], [5], [7], [9], [10], [24], [27], [29]. Aceste măsuri arată că siguranța instalațiilor medicale nu depinde doar de proiectul inițial, ci și de exploatarea și mentenanța permanentă a sistemului

Tabelul 4.2. Corelația între tipul de schemă și nivelul de risc estimat.

Tipul Schemei de Alimentare	**Probabilitate (P)**	**Severitate (S)**	**Nivel Risc (R)**	**Impact asupra Siguranței**
Sistem Radial Simplu	Ridicată	Constantă	**MAXIM**	Risc mare de întrerupere totală.
Sistem cu Dublă Alimentare	Medie	Constantă	**MEDIU**	Redundanță parțială, risc de comutare.
Sistem Buclat / IT Medical	Scăzută	Scăzută*	**MINIM**	Monitorizare IT, risc de incendiu/electrocutare redus.

**Nota: Severitatea (S) în mediul medical rămâne tehnic ridicată, dar prin sistemul IT medical, consecințele imediate asupra pacientului sunt neutralizate la primul defect* [3], [24].

Concluzii parțiale

În concluzie, Capitolul 4 evidențiază că spitalele necesită scheme de alimentare proiectate special, cu redundanță, surse de rezervă, rețele IT medicale și monitorizare continuă. Alegerea corectă a schemei de alimentare reduce probabilitatea întreruperilor, limitează riscul de incendiu sau electrocutare și contribuie la continuitatea actului medical. În infrastructurile medicale, siguranța electrică trebuie tratată ca o condiție esențială de funcționare, nu ca o simplă cerință tehnică.

Capitolul 5

Criterii și politici pentru modernizarea instalațiilor electrice de joasă tensiune

Instalațiile electrice de joasă tensiune au o durată de viață limitată, influențată de calitatea materialelor, condițiile de exploatare, nivelul de întreținere și modificările realizate în timp [7], [11], [23], [32]. Degradarea izolațiilor, oxidarea conexiunilor, supraîncălzirea cablurilor, îmbătrânirea tablourilor și creșterea sarcinilor electrice conduc la scăderea siguranței și a performanței instalației [1], [7], [23]. În lipsa unui plan de modernizare, aceste instalații pot deveni surse de risc pentru incendii, avarii și întreruperi majore în alimentare [1], [2], [23], [26].

În România, o parte importantă a instalațiilor electrice existente a depășit 25–30 de ani de exploatare, fiind proiectată pentru sarcini mult mai mici decât cele actuale [5], [23], [32]. În multe cazuri, instalațiile funcționează la limita capacității, iar buletinele PRAM nu reflectă întotdeauna starea reală a echipamentelor [9], [10], [23]. Cablurile, protecțiile și tablourile electrice prezintă frecvent degradări vizibile, iar lipsa documentației tehnice actualizate face dificilă verificarea corectă și intervenția în siguranță [5], [11], [23], [31].

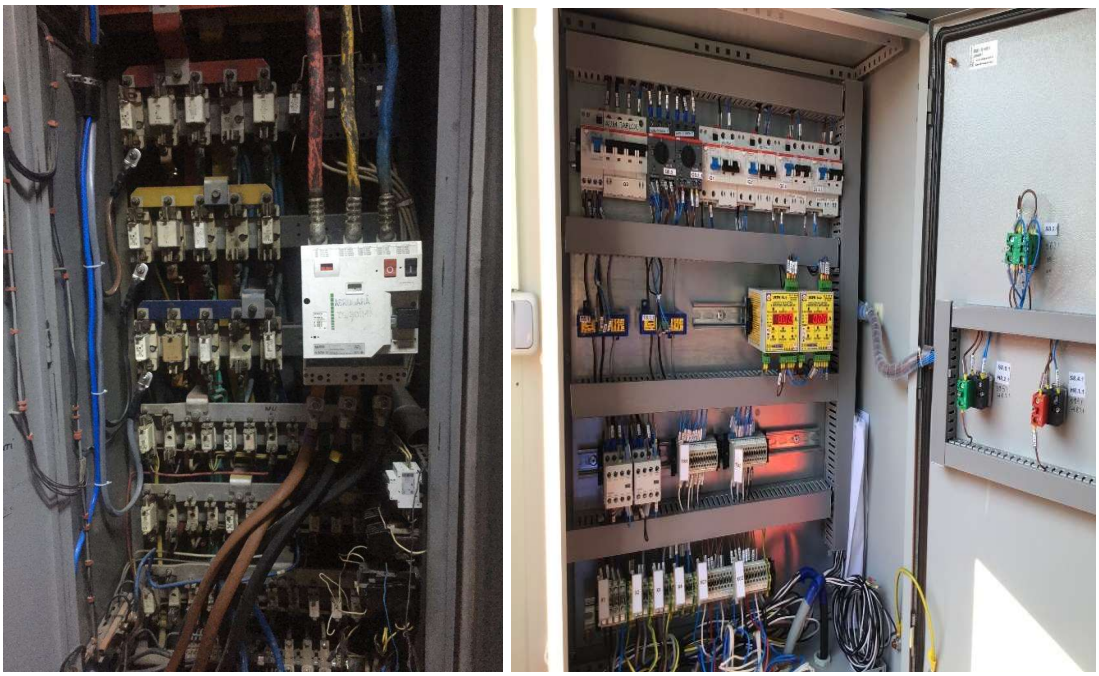


Fig. 5.1. Comparație vizuală între un tablou electric vechi și unul modern echipat cu protecții diferențiale și senzoristică.

Durata de viață a componentelor electrice diferă în funcție de tipul echipamentului și de condițiile de funcționare. Conductoarele și cablurile de cupru pot avea o durată orientativă de 25–35 de ani, tablourile electrice și protecțiile automate aproximativ 20–25 de ani, iar conexiunile și bornele necesită verificări mult mai dese, deoarece sunt expuse slăbirii mecanice, oxidării și încălzirii locale [7], [11], [23], [32].

Tabelul 5.1. Durata de viață orientativă a componentelor instalațiilor electrice.

Componentă / Echipament	**Durată medie de viață (ani)**	**Observații**
Conductoare și cabluri de cupru	25–35	În funcție de încălzire și umiditate
Prize, întrerupătoare, doze	8–12	Supuse uzurii mecanice
Tablouri electrice și protecții automate	20–25	Necesită verificări periodice ale contactelor
Siguranțe și disjunctoare	15–20	Se recomandă înlocuire preventivă după 15 ani
Instalații de împământare	20–30	În funcție de coroziunea solului
Conexiuni și borne	10–15	Necesită strângere și curățare anuală

Aceste valori pot varia în funcție de regimul de utilizare, de numărul de cicluri de comutare și de mediul de funcționare (uscat, umed, industrial sau coroziv) [6], [7], [11].

Decizia de modernizare trebuie să se bazeze pe trei criterii principale: criteriul tehnic, criteriul economic și criteriul de risc [7], [11], [23], [32]. Criteriul tehnic urmărește vechimea

instalației, uzura echipamentelor, defectele repetate și valorile neconforme la măsurători. Criteriul economic compară costurile de mentenanță cu costul modernizării. Criteriul de risc analizează probabilitatea producerii unui accident sau incendiu, în raport cu severitatea consecințelor [1], [2], [23], [26].

În practică, instalațiile nesigure pot fi identificate prin indicatori vizuali și tehnici(proiect): cabluri cu izolație decolorată sau rigidizată, urme de supraîncălzire pe borne, miros de izolație arsă, diferențe mari de temperatură între faze, siguranțe supradimensionate, lipsa dispozitivelor diferențiale, lipsa împământării vizibile și declanșări frecvente ale protecțiilor [4], [7], [16], [17], [23], [25].

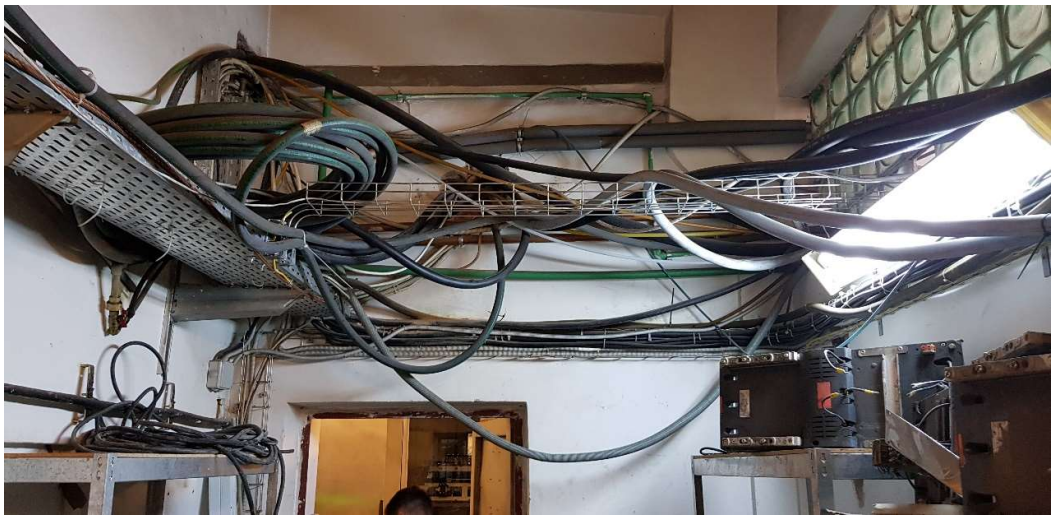


Fig. 5.2. Exemple de deficiențe vizibile în instalațiile vechi.

Pentru prevenirea degradării accelerate, capitolul recomandă implementarea unei politici de mentenanță preventivă. Aceasta trebuie să includă verificări vizuale semestriale, măsurători PRAM anuale, inspecții termografice anuale, curățarea și strângerea conexiunilor, testarea protecțiilor automate și evaluarea periodică a instalației de împământare [7], [9], [10], [11], [17], [25]. Aceste activități trebuie completate cu planuri de reparații capitale la 20–30 de ani, când se impune înlocuirea cablurilor, tablourilor, prizelor și sistemelor de protecție [7], [11], [23].

Un aspect esențial al capitolului este clarificarea responsabilităților în procesul de modernizare. Proiectantul trebuie să elaboreze soluția tehnică, executantul trebuie să respecte proiectul și să utilizeze materiale certificate, verificatorul sau consultantul trebuie să controleze calitatea lucrărilor, beneficiarul trebuie să asigure finanțarea și arhivarea documentației, iar autoritățile trebuie să verifice respectarea normelor legale [4], [11], [27], [29], [31]. Lipsa colaborării între aceste entități este una dintre cauzele principale ale apariției instalațiilor neconforme [5], [11], [23].



Fig. 5.3. SCHEMA LOGICĂ A UNEI INSTALAȚII ELECTRICE SIGURE.

Modernizarea instalațiilor trebuie corelată cu analiza riscului. Dacă nivelul de risc depășește pragul admis, instalația trebuie declarată nesigură și modernizată [1], [7], [23]. Astfel, decizia nu trebuie să se bazeze doar pe vechimea instalației, ci și pe comportamentul real în exploatare, confirmat prin măsurători termice, curenți, tensiuni și inspecții vizuale [1], [7], [10].

În figura 5.4 se prezintă un exemplu de măsurătoare termografică într-un tablou electric, prin care se evidențiază un punct cald cu temperatura maximă de aproximativ 80,4 °C, indicând posibile contacte imperfecte sau suprasolicitări locale.

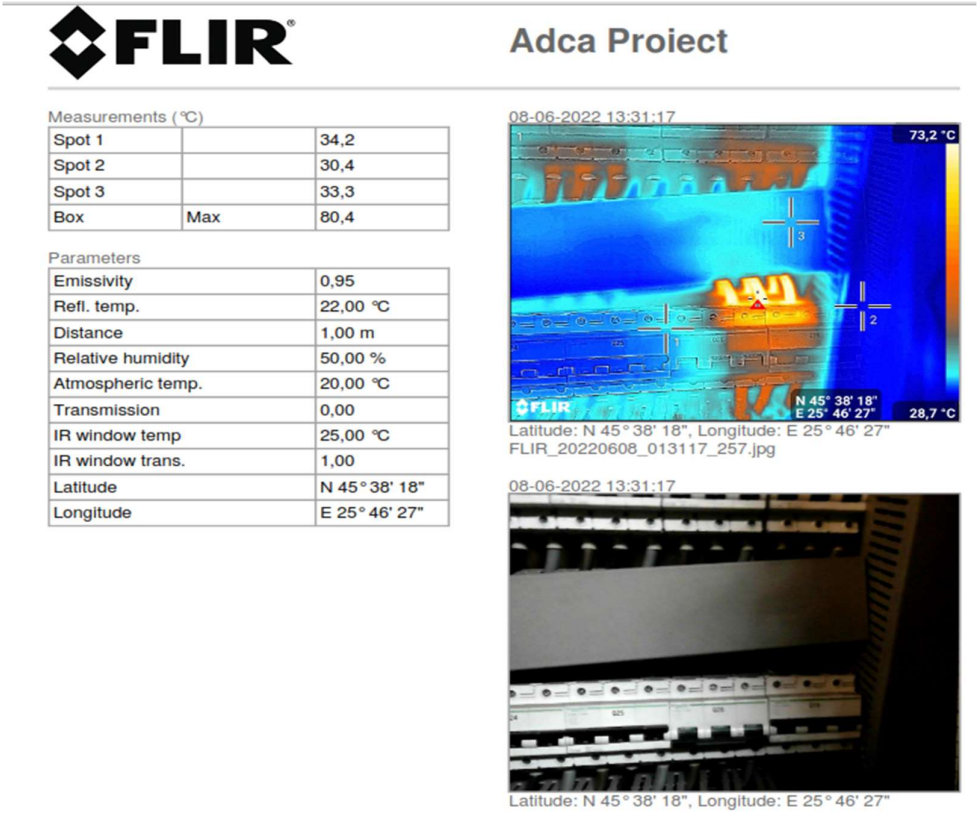


Fig. 5.4. Exemplu de măsurătoare cu camera de termoviziune într-un tablou electric.

Concluzii

În concluzie, modernizarea instalațiilor electrice de joasă tensiune este o măsură esențială pentru reducerea riscului de incendii și accidente. Instalațiile vechi, chiar dacă au buletine de verificare conforme, pot prezenta riscuri reale din cauza degradării, a modificărilor succesive și a creșterii sarcinilor [7], [10], [23], [32]. Decizia de modernizare trebuie fundamentată pe criterii tehnice, economice și de risc, iar siguranța instalației trebuie susținută prin mentenanță preventivă, documentație actualizată, responsabilități clare și monitorizare în timp real.

Capitolul 6

Sistem de monitorizare termică pentru tablourile electrice

Capitolul 6 prezintă un experiment realizat pentru a evidenția legătura directă dintre depășirea sarcinii electrice admise, creșterea rapidă a temperaturii conductorului și apariția riscului de incendiu. Scopul principal al capitolului nu este impunerea imediată a unui anumit sistem de monitorizare în tablourile electrice existente, ci demonstrarea experimentală a faptului că un cablu dimensionat greșit sau suprasolicitat se poate încălzi într-un timp foarte scurt până la temperaturi periculoase [1], [7], [23].

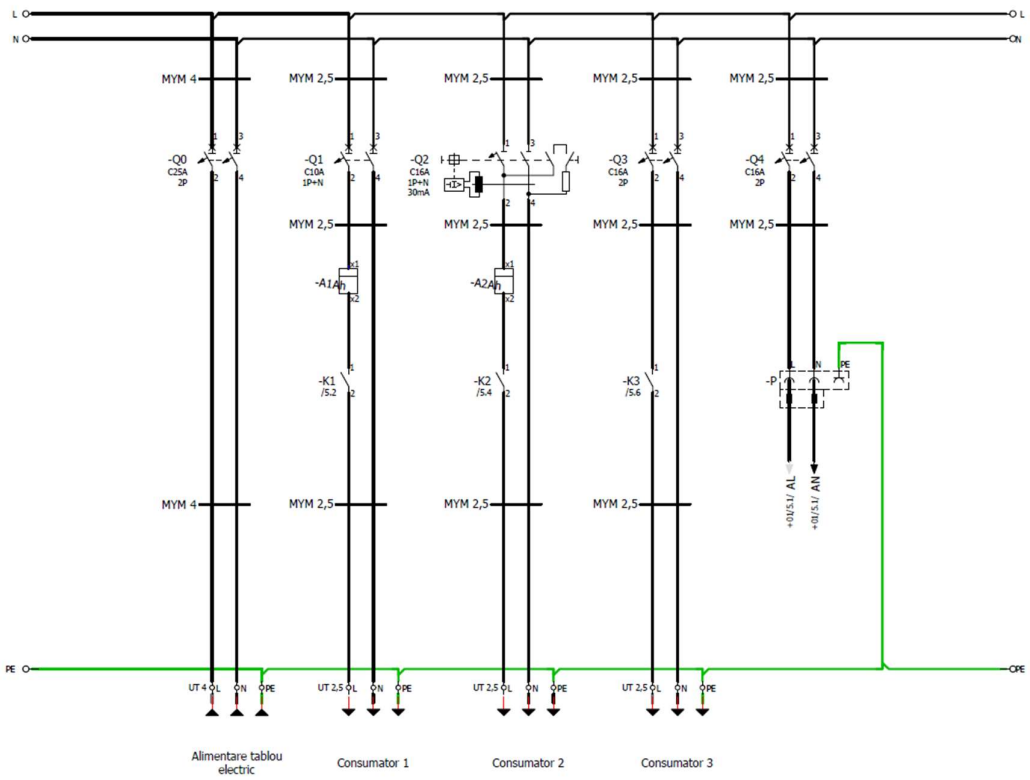
Creșterea temperaturii în tablourile electrice este unul dintre cei mai importanți indicatori ai unui defect incipient. Contactele imperfecte, suprasarcinile, oxidarea conexiunilor și alegerea greșită a secțiunii cablului produc pierderi Joule, care determină încălzirea conductorului și degradarea izolației [1], [7], [10], [23]. În multe cazuri, protecțiile clasice pot să nu declanșeze imediat, deși temperatura conductorului ajunge la valori care afectează izolația și cresc riscul de incendiu.

Pentru verificarea acestei ipoteze, a fost realizat un montaj experimental alcătuit dintr-un tablou electric de test, senzori de temperatură, microcontroler Arduino, afișaj LCD, relee, semnalizare optică și acustică și cameră de termoviziune. Sistemul a permis măsurarea temperaturii în timp real în puncte critice ale circuitului și compararea valorilor obținute cu măsurătorile realizate prin camera termografică [1], [7], [23].

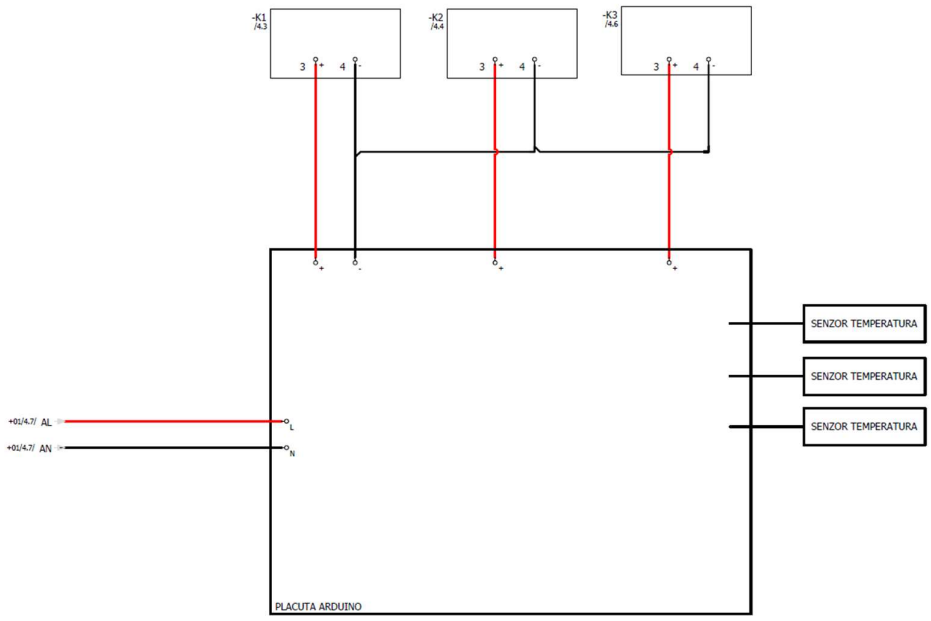
Tabelul 6.1. Componentele utilizate în experimentul de monitorizare termică.

Nr. crt.	**Componentă**	**Specificații principale**	**Rol**
1	Arduino Uno R4	microcontroler ATmega32U4	achiziție date și control
2	Senzori DS18B20 (6 buc.)	gamă -55°C...+125°C, precizie ±0.5°C	măsurare temperatură pe circuite
3	LCD 1602	afișaj 2x16 caractere	vizualizare locală a datelor
4	Relee SSR (Solid State Relay)	3 canale, 240V/2A	decuplare automată la prag critic
5	Modul buzzer + LED-uri	-	semnalizare acustică și optică
6	Surse de alimentare 5V și 12V	stabilizate	alimentare microcontroler și senzori
7	Cameră termoviziune (Flir One Pro)	rezoluție 160x120	verificare experimentală a valorilor

Senzorii de temperatură au fost montați în trei zone distincte ale tabloului (câte doi per fază: A-B, C-D, E-F), astfel încât să acopere toate circuitele principale. Releele SSR acționează decuplarea automată a circuitului afectat atunci când temperatura depășește pragul critic T_x [1], [7], [23].


L
N
MYM 4
MYM 2,5
-Q0
C25A
2P
-Q1
C10A
1P+N
-Q2
C16A
1P+N
30mA
-Q3
C16A
2P
-Q4
C16A
2P
-A1Ah
-A2Ah
-K1
/5.2
-K2
/5.4
-K3
/5.6
-P
PE
+01/5.1/ AL
+01/5.1/ AN
UT 4 L N PE
UT 2,5 L N PE
Alimentare tablou electric
Consumator 1
Consumator 2
Consumator 3

a)


-K1
/4.3
-K2
/4.4
-K3
/4.6
SENZOR TEMPERATURA
SENZOR TEMPERATURA
SENZOR TEMPERATURA
+01/4.7/ AL
+01/4.7/ AN
PLACUTA ARDUINO

b)



c)

Fig. 6.1. a) Schema monofilară a tabloului electric ; b) schema sistemului de monitorizare termică Arduino si c) fotografii din timpul experimentului.

Sistemul a fost programat să citească temperaturile la intervale scurte de timp, să compare valorile cu pragurile prestabilite și să semnalizeze depășirea acestora. Pragurile utilizate în experiment au fost: 45°C pentru avertizare, 60°C pentru decuplare și 80°C pentru alarmă critică [1], [7], [23]. Aceste valori au fost folosite pentru a observa comportamentul termic al conductorului și pentru a evidenția cât de rapid se poate ajunge la o stare periculoasă

Tabelul 6.2. Praguri de temperatură pentru sistemul de monitorizare.

Prag	**Valoare (°C)**	**Acțiune declanșată**
T_w	45°C	Avertizare sonoră și LED galben
T_x	60°C	Decuplare circuit + LED roșu
T_{max}	80°C	Alarmă critică + blocare sistem

Rezultatele experimentale au arătat că temperatura conductorului crește foarte repede atunci când curentul depășește valoarea admisibilă pentru secțiunea cablului. Testele au fost

realizate pe conductoare de 0,75 mm² și 1 mm², cu sarcini controlate, iar valorile au fost monitorizate simultan prin senzorii instalați și prin camera de termoviziune [1], [7], [23]. În cazul cablului de 0,75 mm², s-a observat că la o depășire de aproximativ trei ori a curentului nominal, temperatura a depășit 45°C în numai 6 minute. La o depășire de 3,6 ori, temperatura a trecut de 68°C în aproximativ 7 minute, iar la o depășire de 3,82 ori, temperatura a ajuns peste 86°C în aproximativ 9 minute [23].

In figura 6.2 este redat evoluția temperaturilor măsurate în punctele C și D, comparativ cu variația curentului electric în timp, evidențiind creșterea temperaturii odată cu solicitarea circuitului.

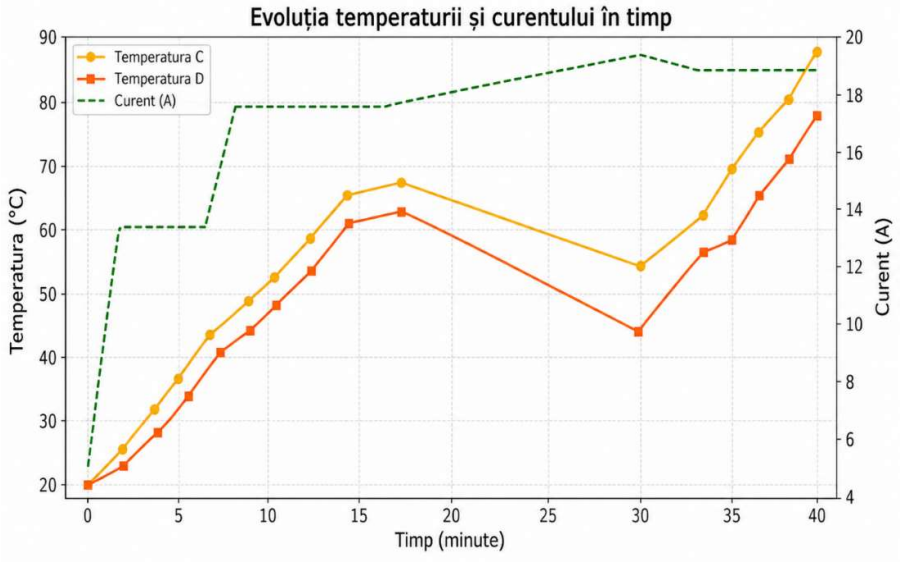


Fig. 6.2. Graficul temperaturii în funcție de timp pentru diferite sarcini.

Rezultatele confirmă faptul că verificarea doar a curentului sau existența unei protecții automate nu este întotdeauna suficientă pentru a preveni degradarea termică. În experiment, au existat situații în care protecția nu a declanșat imediat, deși temperatura conductorului a crescut până la valori periculoase pentru izolație [1], [7], [23]. Această observație susține ideea că temperatura este un indicator practic și relevant pentru identificarea riscului de incendiu.

Corelarea temperaturii cu riscul de incendiu este explicată prin degradarea accelerată a izolației. Conform modelului Arrhenius, viteza de degradare a materialelor izolante crește exponențial cu temperatura. La aproximativ 80°C, durata de viață a izolației PVC se reduce de aproximativ 600 de ori față de condițiile normale de funcționare la 25°C [1], [7], [23]. Această constatare arată că funcționarea repetată sau prelungită la temperaturi ridicate poate deteriora rapid cablul, chiar dacă instalația pare să funcționeze.

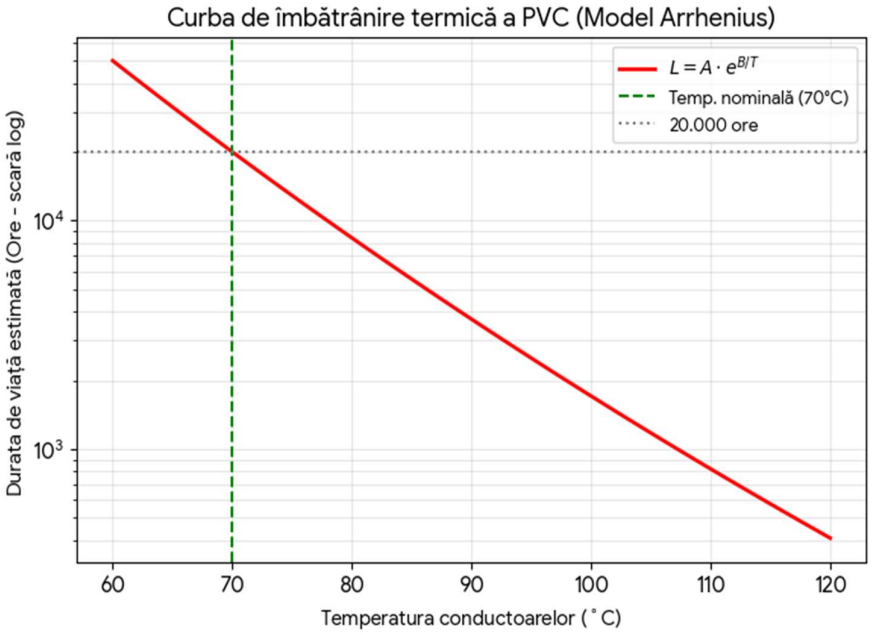


Fig. 6.3. Curba de degradare a izolației PVC în funcție de temperatură (model Arrhenius).

Capitolul prezintă și posibilitatea extinderii unui astfel de concept prin sisteme digitale de monitorizare, cu înregistrarea valorilor, vizualizarea temperaturilor în timp real și transmiterea alertelor la depășirea pragurilor [7], [23]. Totuși, utilizarea unui asemenea sistem în tablouri electrice existente trebuie tratată ca o direcție de cercetare și dezvoltare. Implementarea practică la scară largă trebuie realizată numai după omologare, verificare tehnică, certificare și aprobare de către organismele competente, astfel încât sistemul să respecte cerințele de siguranță, compatibilitate electromagnetică și fiabilitate impuse instalațiilor electrice.

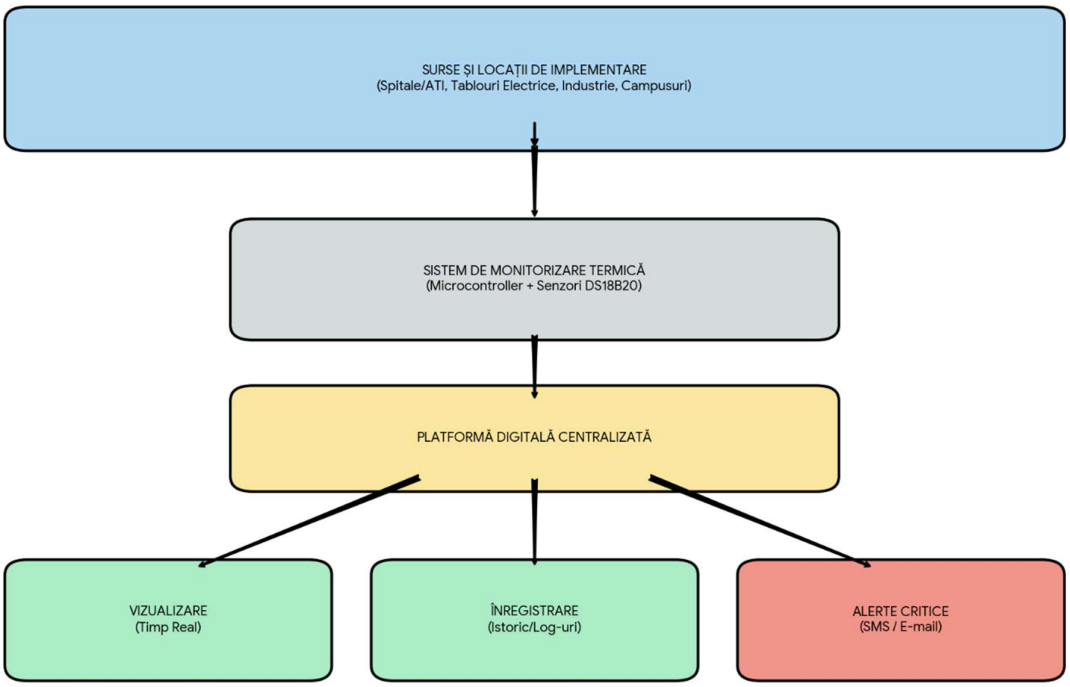


Fig. 6.4. Conceptul unui sistem de monitorizare extins (IoT + cloud).

Concluzii

În concluzie, Capitolul 6 demonstrează experimental că suprasolicitarea unui cablu sau dimensionarea greșită a acestuia poate conduce la creșteri rapide ale temperaturii și la degradarea accelerată a izolației. Un cablu aparent funcțional poate ajunge în câteva minute la temperaturi periculoase, ceea ce explică de ce instalațiile electrice subdimensionate sau modificate necorespunzător reprezintă un risc major de incendiu. Sistemul experimental utilizat confirmă importanța monitorizării temperaturii ca metodă de identificare a defectelor incipiente, însă implementarea unor sisteme similare în tablourile existente trebuie realizată numai după omologare și aprobare de către forurile tehnice competente.

Capitolul 7

Adaptarea impedanței în liniile de transmisie a semnalelor

Capitolul 7 prezintă fundamentele teoretice ale adaptării impedanței în liniile de transmisie, cu accent pe transferul eficient de energie, reducerea reflexiilor de semnal și limitarea pierderilor suplimentare în circuite electrice și electronice. În contextul tezei, acest capitol are rolul de a completa partea experimentală și aplicativă printr-un model teoretic care

explică modul în care nepotrivirea dintre sursă, linie și sarcină poate conduce la funcționare necorespunzătoare, pierderi energetice, solicitări suplimentare ale componentelor și, indirect, la creșterea riscului tehnic în instalațiile de joasă tensiune [33]–[36].

Adaptarea impedanței reprezintă procesul prin care impedanța văzută de o sursă sau de o linie de transmisie este ajustată astfel încât transferul de putere către sarcină să fie cât mai eficient, iar energia reflectată să fie cât mai redusă. În cazul general, transferul maxim de putere se obține atunci când impedanța sarcinii este conjugata complexă a impedanței sursei:

$$\underline{Z}_S = \underline{Z}_L^*, \tag{7.1}$$

unde (Z_L) este impedanța sarcinii, (Z_S) este impedanța sursei, iar simbolul (*) indică conjugatul complex. Pentru circuite pur rezistive, această condiție se reduce la egalitatea dintre rezistența sursei și rezistența sarcinii. În cazul liniilor de transmisie, pentru reducerea reflexiilor, condiția de adaptare se exprimă prin egalitatea dintre impedanța sarcinii și impedanța caracteristică a liniei:

$$\underline{Z}_S = \underline{Z}_L. \tag{7.2}$$

Această condiție este importantă deoarece, atunci când sarcina nu este adaptată la linie, o parte din energia transmisă nu ajunge la sarcină, ci se reflectă înapoi spre sursă. Reflexiile pot produce pierderi suplimentare, distorsiuni, unde staționare și o comportare dependentă de frecvență, mai ales în circuitele de radiofrecvență și în liniile de transmisie [55]–[67].

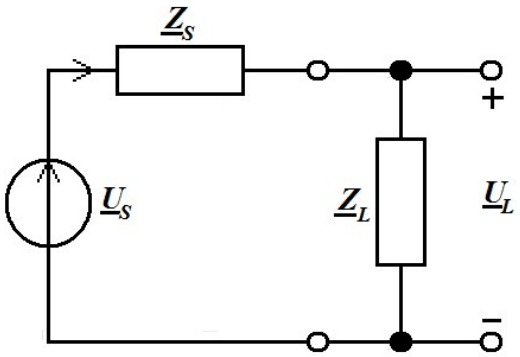


Fig. 7.3. Sursa și impedanța circuitului de sarcină.

Gradul de adaptare poate fi evaluat prin coeficientul de reflexie, pierderea de returnare și pierderea de inserție. Coeficientul de reflexie exprimă raportul dintre unda reflectată și unda incidentă și arată cât de mare este dezadaptarea dintre sarcină și linie. Pentru o sarcină conectată la o linie de transmisie, coeficientul de reflexie poate fi scris sub forma:

$$\underline{\Gamma} = \frac{\underline{Z}_L - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_C}. \tag{7.15}$$

unde $\underline{\Gamma}$ este coeficientul de reflexie, $\underline{Z}_L$ este impedanța sarcinii, iar $\underline{Z}_C$ este impedanța caracteristică a liniei. Dacă $\underline{Z}_L = \underline{Z}_C$), atunci $\underline{\Gamma} = 0$, ceea ce înseamnă că nu există reflexie și energia este transmisă către sarcină în condiții optime. Dacă impedanțele sunt diferite, apare o undă reflectată, iar o parte din energia transmisă se întoarce spre sursă.

Pierderea de returnare, cunoscută și ca Return Loss, exprimă în decibeli nivelul undei reflectate față de unda incidentă. O valoare mare a pierderii de returnare indică o adaptare bună, deoarece energia

reflectată este redusă. Pierderea de inserție, numită Insertion Loss, exprimă scăderea nivelului de putere între intrarea și ieșirea unui circuit. Astfel, acești parametri permit evaluarea eficienței transferului de energie și a calității adaptării.



Fig. 7.1. Pierderea de retur și pierderea de inserție într-un circuit fără pierderi sau o linie de transmisie.

Un alt instrument important pentru analiza adaptării este reprezentat de parametrii (S), utilizați în special în circuitele de radiofrecvență și microunde. Acești parametri descriu comportarea externă a unui circuit prin unde incidente și unde emergente, fără a fi necesară cunoașterea detaliată a structurii interne. Pentru un circuit cu două porturi, parametrii S_{11}și S_{22} descriu reflexia la portul de intrare și la portul de ieșire, iar parametrii S_{21}și S_{12} descriu transmisia directă și inversă. Această abordare este utilă deoarece permite caracterizarea circuitelor prin măsurători experimentale sau simulări în domeniul frecvenței.

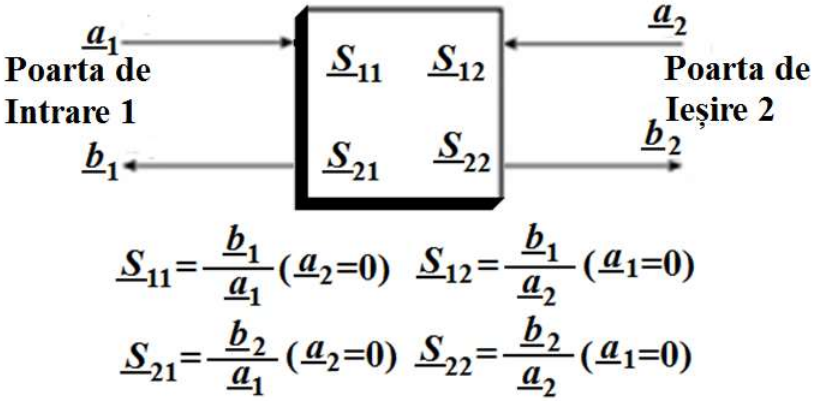


Fig. 7.2. Modelarea unui circuit de microunde cu două porturi utilizând parametrii S.

Unde a_1 și a_2 sunt undele incidente, iar b_1și b_2 sunt undele emergente sau reflectate. Prin această formulare, se poate analiza simultan reflexia, transmisia și izolarea circuitului.

Capitolul prezintă mai multe metode de adaptare a impedanței. Prima categorie este reprezentată de transformatoare, utilizate pentru transformarea nivelurilor de tensiune și impedanță. O altă categorie este reprezentată de rețelele de tip L, formate din două elemente reactive, de regulă o bobină și un condensator. Aceste rețele permit adaptarea unei surse sau a unei sarcini la o linie de transmisie prin compensarea componentelor reactive și transformarea impedanței la valoarea dorită.

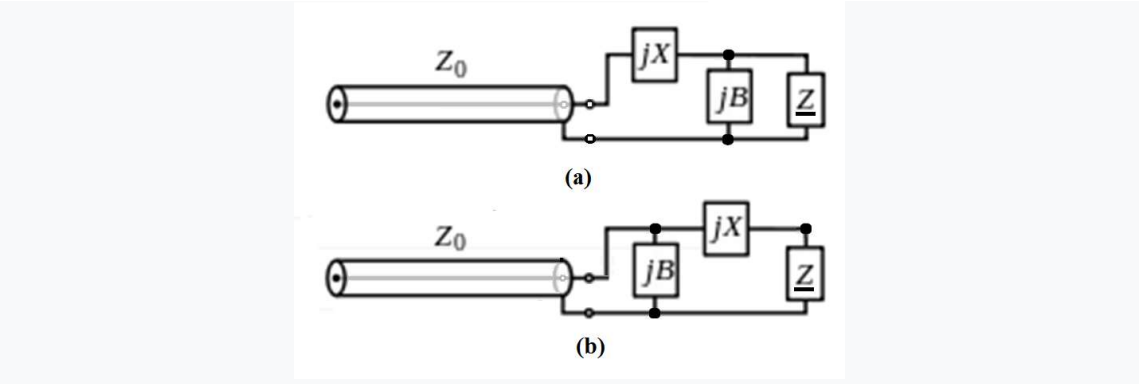


Fig. 7.5. Rețele de tip *L* pentru adaptarea impedanței unei surse sau a unei sarcini la o linie de transmisie cu impedanța caracteristică Z_0

Pentru cazul unei sarcini pur rezistive, capitolul analizează adaptarea prin intermediul unui tronson de linie de transmisie de lungime $\lambda/4$. Acest tronson funcționează ca un transformator de impedanță, iar impedanța văzută la intrarea lui este:

$$\underline{Z}_{in} = Z_c = Z_0. \tag{7.19}$$

unde $\underline{Z}_{in}$ este impedanța de intrare a tronsonului, Z_0 este impedanța caracteristică a tronsonului de adaptare, iar Z_c este impedanța sarcinii. Pentru a obține adaptarea, impedanța caracteristică a tronsonului se poate calcula cu relația:

$$\underline{Z}_{in} = \frac{Z'^2_0}{\underline{Z}_L}. \tag{7.22}$$

unde Z_0 este impedanța caracteristică a liniei principale. Această metodă este simplă și eficientă, dar este dependentă de frecvență, deoarece lungimea electrică $\lambda/4$ depinde de lungimea de undă.

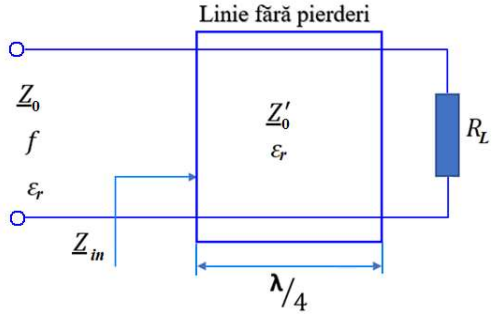


Fig. 7.7. Adaptarea unei sarcini pur rezistive folosind o linie de transmisie de lungime λ/4.

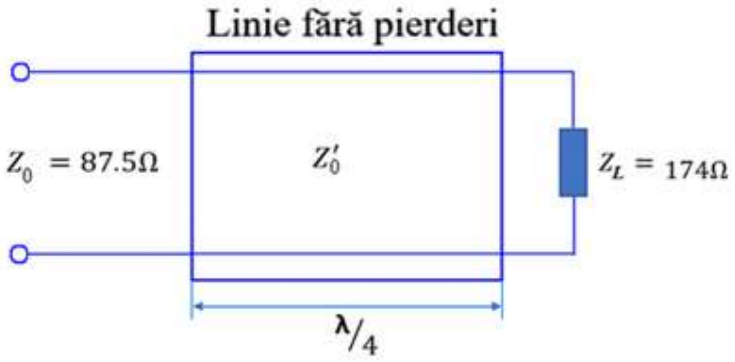


Fig. 7.14**.** Adaptarea unei sarcini pur rezistive folosind un tronson de linie de lungime λ/4.

Pentru sarcinile complexe, adaptarea este mai dificilă deoarece trebuie compensate atât partea reală, cât și partea reactivă a impedanței. Capitolul prezintă rețele de adaptare formate din două elemente reactive ideale, conectate în serie și în paralel cu sarcina. În funcție de ordinea elementelor, se pot obține configurații de tip paralel–serie sau serie–paralel. Aceste rețele permit transformarea impedanței complexe a sarcinii într-o impedanță echivalentă egală cu impedanța caracteristică a liniei.

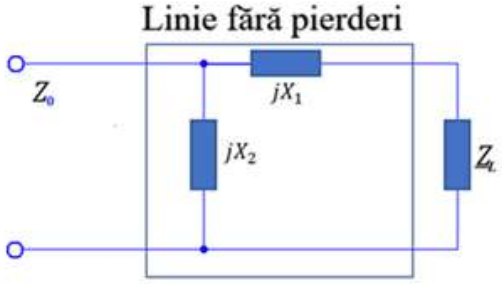


Fig. 7.8. Linie de transmisie fără pierderi, terminată pe o sarcină arbitrară de impedanță Z_L, adaptată prin intermediul a două elemente pur reactive.

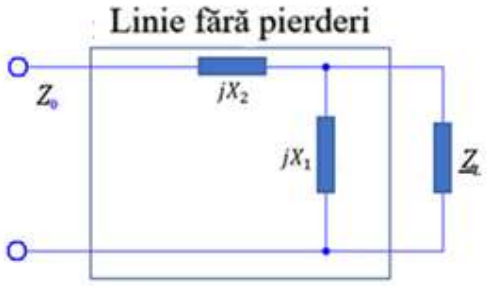


Fig. 7.9. Adaptarea impedanței prin intermediul unei rețele reactive de adaptare cu topologie paralel–serie.

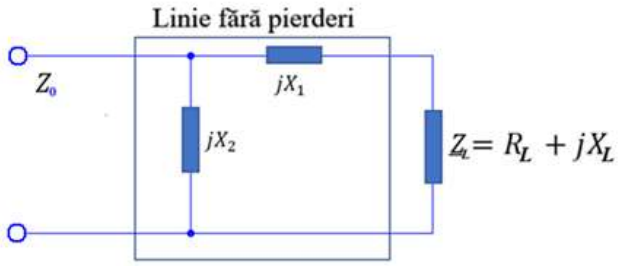


Fig. 7.10. Adaptarea impedanței prin intermediul unei rețele reactive de adaptare cu topologie serie–paralel (jX_1 serie cu $\underline{Z}_L$ și în paralel cu jX_2).

Un instrument grafic important utilizat în capitol este diagrama Smith. Aceasta permite reprezentarea impedanțelor și admitanțelor normalizate, precum și vizualizarea modului în care elementele reactive serie sau paralel modifică poziția impedanței pe diagramă. Prin folosirea diagramei Smith, procesul de adaptare devine mai intuitiv, deoarece se poate observa grafic cum o impedanță se deplasează spre centrul diagramei, punct care corespunde adaptării.

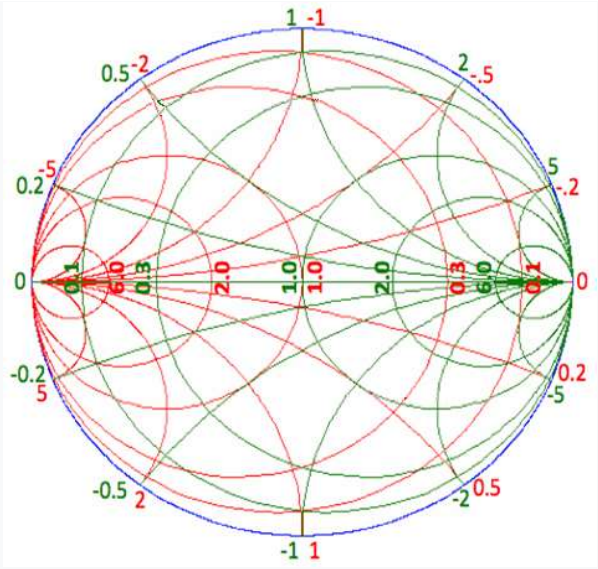


Fig. 7.21. Diagrama Smith cu imitanțe.

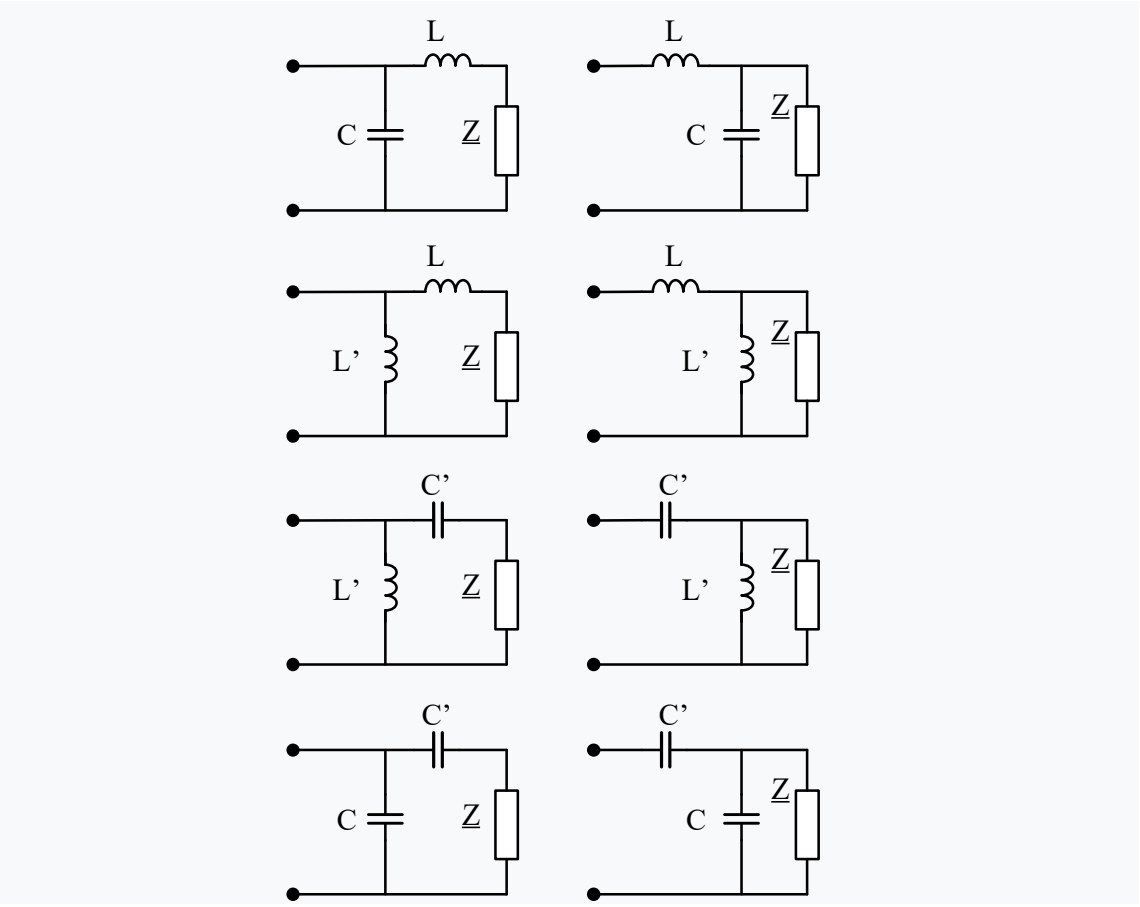


Fig. 7.26. Configurații posibile pentru adaptarea impedanței.

În partea finală, capitolul prezintă metode de determinare a valorilor componentelor pentru secțiuni de tip L și T. Prin utilizarea diagramei Smith sau prin calcul analitic, se pot obține valorile bobinelor și condensatoarelor necesare pentru ca impedanța de intrare să se apropie de impedanța țintă. De exemplu, pentru o impedanță de normalizare de 50 Ω și o frecvență de lucru de 1 GHz, sunt calculate valori de ordinul nanohenry pentru inductanțe și picofarad pentru capacități. Aceste exemple arată caracterul aplicativ al metodelor prezentate și posibilitatea implementării lor în medii de calcul precum MAPLE sau MATLAB.

În concluzie, Capitolul 7 prezintă adaptarea impedanței ca metodă fundamentală pentru creșterea eficienței transferului de energie și reducerea reflexiilor în liniile de transmisie. Prin condiția de adaptare, coeficientul de reflexie, parametrii (S), rețelele de tip L și T, liniile λ/4 și diagrama Smith, capitolul oferă un cadru teoretic pentru analiza pierderilor, reflexiilor și solicitărilor suplimentare din circuite. În raport cu tema tezei, acest capitol contribuie la înțelegerea mecanismelor prin care nepotrivirea dintre sursă, linie și sarcină poate conduce la pierderi energetice, funcționare necorespunzătoare și solicitări termice ale componentelor. Astfel, analiza adaptării impedanței susține obiectivul general al lucrării, respectiv reducerea riscului și creșterea fiabilității instalațiilor electrice de joasă tensiune.

Capitolul 8

Generarea parametrilor cuadripolilor și filtrelor analogice

Capitolul 8 prezintă un cadru teoretic și aplicativ pentru modelarea cuadripolilor și a filtrelor analogice, cu scopul de a caracteriza propagarea semnalelor, transferul de energie și comportarea circuitelor în funcție de frecvență. În cadrul tezei, acest capitol completează analiza practică a instalațiilor electrice prin instrumente matematice și numerice care permit identificarea pierderilor, evaluarea transferului de semnal și diagnosticarea unor regimuri de funcționare necorespunzătoare.

Cuadripolul este tratat ca un circuit liniar pasiv cu două porți, una de intrare și una de ieșire, care poate fi descris prin diferite seturi de parametri: parametri fundamentali de transfer (T), parametri de impedanță (Z), parametri de admitanță (Y), parametri hibrizi (H), parametri hibrizi inversați (F) și parametri de împrăștiere (S). Fiecare categorie de parametri oferă o modalitate diferită de analiză a aceluiași circuit, în funcție de domeniul de frecvență, de mărimile măsurabile și de scopul studiului [69]–[94].

Ecuațiile asociate unui cuadripol liniar pasiv, reprezentat în figura 8.1, exprimate în parametri fundamentali de transfer și considerate în regim armonic, pot fi scrise sub forma, [69 – 81]:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix}. \tag{8.1}$$

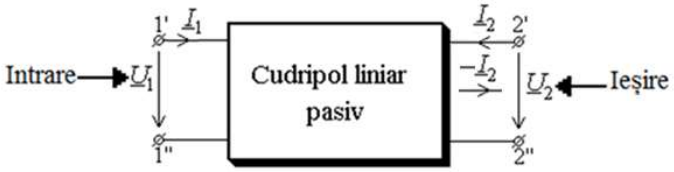


Fig. 8.1. Reprezentarea schematică a unui cuadripol liniar pasiv.

Descrierea cuadripolului prin parametri fundamentali de transfer este prezentată în relația (8.1), iar definirea acestor parametri apare în relația (8.2). Parametrii de impedanță sunt introduși prin relațiile (8.3) și (8.4), iar parametrii de admitanță prin relațiile (8.5) și (8.6). Pentru situațiile în care descrierea prin impedanțe sau admitanțe nu este convenabilă, capitolul introduce parametrii hibrizi (H), prin relațiile (8.7) și (8.8), respectiv parametrii hibrizi inversați (F), prin relațiile (8.9) și (8.10).

Prin definiție, parametrii fundamentali se exprimă prin relațiile:

$$\underline{A} \stackrel{d}{=} \left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_2=0} = \frac{1}{\underline{A}_{ei}}; \quad \underline{B} \stackrel{d}{=} \left.\frac{\underline{U}_1}{-\underline{I}_2}\right|_{\underline{U}_2=0} = \frac{1}{\underline{Y}_{ei}}; \quad \underline{C} \stackrel{d}{=} \left.\frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_2=0} = \frac{1}{\underline{Z}_{ei}}; \quad \underline{D} \stackrel{d}{=} \left.\frac{\underline{I}_1}{-\underline{I}_2}\right|_{\underline{U}_2=0} = \frac{1}{\underline{B}_{ei}} \ . \tag{8.2}$$

Ecuaţiile în impedanţe ale unui cuadripol liniar pasiv în regim armonic au expresiile:

$$\begin{bmatrix}\underline{U}_1\\ \underline{U}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12}\\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{I}_1\\ \underline{I}_2\end{bmatrix}, \tag{8.3}$$

unde impedanțele complexe de transfer sunt definite prin relațiile următoare:

$$\underline{Z}_{11}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}\right|_{\underline{I}_2=0}=\underline{Z}_{ii};\ \ \underline{Z}_{12}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2}\right|_{\underline{I}_1=0}=\underline{Z}_{ie};\ \ \underline{Z}_{21}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1}\right|_{\underline{I}_2=0}=\underline{Z}_{ei};\ \ \underline{Z}_{22}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}\right|_{\underline{I}_1=0}=\underline{Z}_{ee} \tag{8.4}$$

Ecuațiile caracteristice ale unui cuadripol liniar pasiv, formulate în termenii parametrilor de admitanță, se exprimă sub forma:

$$\begin{bmatrix}\underline{I}_1\\ \underline{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12}\\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{U}_1\\ \underline{U}_2\end{bmatrix}, \tag{8.5}$$

unde admitanțele complexe de transfer sunt definite prin următoarele relații:

$$\underline{Y}_{11}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1}\right|_{\underline{U}_2=0}=\underline{Y}_{ii};\ \ \underline{Y}_{12}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{U}_1=0}=\underline{Y}_{ie};\ \ \underline{Y}_{21}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1}\right|_{\underline{U}_2=0} \tag{8.6}$$

$$=\underline{Y}_{ei};\ \ \underline{Y}_{22}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{U}_1=0}=\underline{Y}_{ee}.$$

$$\begin{bmatrix}\underline{U}_1\\ \underline{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{H}_{11} & \underline{H}_{12}\\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{I}_1\\ \underline{U}_2\end{bmatrix}, \tag{8.7}$$

Acești parametri sunt foarte utili în descrierea dispozitivelor electronice, cum ar fi tranzistoarele și altele. Parametrii hibrizi complecși se pot defini astfel:

$\underline{H}_{11}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}\right|_{\underline{U}_2=0}=\underline{Z}_{ii}\big|_{\underline{U}_2=0}=\underline{Z}_{11}\big|_{\underline{U}_2=0}$- impedanța complexă de la intrare cu ieșirea în scurtcircuit;

$\underline{H}_{12}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_1=0}=\underline{A}_{ie}\big|_{\underline{I}_1=0}$- factorul de transfer (amplificare) în tensiune de la ieșire la intrare cu intrarea în gol;

$\underline{H}_{21}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1}\right|_{\underline{U}_2=0}=B_{ie}|_{\underline{U}_2=0}$- factorul de transfer (amplificare) în curent cu ieșirea în scurtcircuit și (8.8)

$\underline{H}_{22}\overset{d}{=}\left.\frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_1=0}=\underline{Y}_{ee}\big|_{\underline{I}_1=0}=\underline{Y}_{22}\big|_{\underline{I}_1=0}$- minus admitanța complexă de la ieșire cu intrarea în gol.

În cazul în care mărimile $\underline{I}_1$ și $\underline{U}_2$ sunt considerate variabile dependente, acestea descriu răspunsul cuadripolului la excitația definită prin tensiunea de intrare $\underline{U}_1$și curentul de ieșire $\underline{I}_2$. Această formulare conduce la reprezentarea prin parametrii $\underline{F}$, denumiți și parametrii hibrizi inversați. În regim armonic, ecuațiile unui cuadripol liniar pasiv exprimate în parametri $\underline{F}$ pot fi scrise sub forma:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F}_{11} & \underline{F}_{12} \\ \underline{F}_{21} & \underline{F}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}, \tag{8.9}$$

Acești parametri sunt foarte utili în descrierea dispozitivelor electronice, cum ar fi tranzistoarele și altele. Parametrii complecși $\underline{F}$ se definesc prin următoarele relații::

$$\begin{aligned} &\underline{F}_{11} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1}\Big|_{\underline{I}_2=0} = \underline{Y}_{ii}\big|_{\underline{I}_2=0} = \underline{Y}_{11}\big|_{\underline{I}_2=0} \text{- admitanța complexă la intrare cu ieșirea în gol;} \\ &\underline{F}_{12} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}\Big|_{\underline{U}_1=0} = \frac{1}{\underline{B}_{ei}}\Big|_{\underline{U}_1=0} \text{- inversul factorului de transfer (amplificare) în curent de} \\ &\text{la ieșire la intrare cu intrarea în scurtcircuit;} \\ &\underline{H}_{21} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1}\Big|_{\underline{I}_2=0} = A_{ei}|_{\underline{I}_2=0} \text{- factorul de transfer (amplificare) în tensiune de la ieșire} \\ &\text{la intrare cu ieșirea în gol și} \\ &\underline{F}_{22} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}\Big|_{\underline{U}_1=0} = \underline{Z}_{ee}\big|_{\underline{U}_1=0} = \underline{Z}_{22}\big|_{\underline{U}_1=0} \text{- minus impedanța complexă de la ieșire cu} \\ &\text{intrarea în scurtcircuit.} \end{aligned} \tag{8.10}$$

Rolul lor este să arate că același circuit poate fi descris prin mai multe reprezentări matematice echivalente. Ideea importantă este că, odată determinați unii parametri ai circuitului, ceilalți pot fi obținuți prin relații de conversie.

Capitolul analizează și condițiile de reciprocitate și simetrie ale cuadripolilor. Relațiile (8.11)–(8.14) sunt utilizate pentru a arăta când un cuadripol este reciproc și cum se modifică parametrii atunci când poarta de intrare și poarta de ieșire sunt inversate. Pentru un cuadripol simetric, condiția importantă este $\underline{A} = \underline{D}$ ceea ce înseamnă că cele două porți au un comportament echivalent din punctul de vedere al transferului.

Un cuadripol liniar pasiv este, în regim armonic, reciproc dacă este satisfăcută relația:

$$\underline{I}_1\big|_{\substack{\underline{U}_1=0 \\ \underline{U}_2=-\underline{E}}} = \underline{I}_2\big|_{\substack{\underline{U}_1=\underline{E} \\ \underline{U}_2=0}}. \tag{8.11}$$

Luând în considerare ecuațiile (8.1), (8.3) și (8.5), relația (X211) este echivalentă cu următoarele relații între parametrii cuadripolului:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1; \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{12} \text{ si, respectiv } \underline{Y}_{12} = Y_{12}. \tag{8.12}$$

Dacă se consideră ca poartă de intrare poarta 2' – 2", cu mărimile de intrare ($\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$), iar ca poartă de ieșire poarta 1' – 1", cu mărimile de ieșire ($\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$), folosind ecuațiile (8.1) mărimile de intrare ($\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$) au, în funcție de mărimile de ieșire ($\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$), expresiile:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\underline{D}}{\underline{AD} - \underline{BC}} & -\dfrac{\underline{B}}{\underline{AD} - \underline{BC}} \\ \dfrac{\underline{C}}{\underline{AD} - \underline{BC}} & -\dfrac{\underline{A}}{\underline{AD} - \underline{BC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix}. \tag{8.13}$$

Dacă cuadripolul liniar pasiv considerat este reciproc ecuațiile (7.13) devin:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{D} & -\underline{B} \\ \underline{C} & -\underline{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix}, \tag{8.14}$$

ceea ce arată că la considerarea ca poartă de intrare poarta 2' – 2" și ca poartă de ieșire poarta 1' – 1", constantele $\underline{A}$ și $\underline{D}$ se schimbă între ele.

Un rol important îl au impedanțele caracteristice și impedanțele imagine ale cuadripolului. Acestea sunt definite prin relațiile (8.15)–(8.19) și permit evaluarea modului în care circuitul se adaptează la sursă și la sarcină. În cazul filtrelor analogice, pe baza acestor parametri se pot determina benzile de trecere și benzile de oprire, precum și constantele de atenuare și de fază. Condiția de propagare pentru filtrele reciproce și fără pierderi este prezentată prin relația (8.22), iar constantele de atenuare și fază sunt exprimate prin relațiile (8.23) și (8.24).

Impedanțele caracteristice, denumite și impedanțe iterative, ale unui cuadripol liniar pasiv se definesc prin următoarele relații [71-75]:

$$\underline{Z}_{c1} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}\Big|_{\underline{Z}_s=\underline{Z}_{c1}} \; ; \quad \underline{Z}_{c2} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}\Big|_{\underline{Z}_i=\underline{Z}_{c2}} \; , \tag{8.15}$$

iar cele imagine au expresiile:

$$\underline{Z}_{i1} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}\Big|_{\underline{Z}_s=\underline{Z}_{i2}} \; ; \quad \underline{Z}_{i2} \stackrel{d}{=} \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}\Big|_{\underline{Z}_i=\underline{Z}_{i1}} \; . \tag{8.16}$$

Expresiile impedanțelor caracteristice, formulate în funcție de parametrii fundamentali de transfer ai cuadripolului, sunt, [71, 72]:

$$\underline{Z}_{c1} = \frac{1}{2\underline{C}}\left[(\underline{A}-\underline{D}) \pm \sqrt{(\underline{A}-\underline{D})^2 + 4\underline{B}\underline{C}}\right], \quad \underline{Z}_{c2} = \frac{1}{2\underline{C}}\left[(\underline{D}-\underline{A}) \pm \sqrt{(\underline{D}-\underline{A})^2 + 4\underline{B}\underline{C}}\right]. \tag{8.17}$$

Impedanțele imagine, exprimate în funcție de parametrii fundamentali de transfer ai cuadripolului, sunt definite prin relațiile, [71-73]:

$$\underline{Z}_{i1} = \pm\sqrt{\frac{\underline{A}\underline{B}}{\underline{C}\underline{D}}}, \quad \underline{Z}_{i2} = \pm\sqrt{\frac{\underline{D}\underline{B}}{\underline{C}\underline{A}}}. \tag{8.18}$$

Dacă cuadripolul este simetric, ecuaţiile (8.17) şi (8.18) devin:

$$\underline{Z}_{c1} = \underline{Z}_{c2} = \underline{Z}_{i1} = \underline{Z}_{i2} = \pm\sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}}. \tag{8.19}$$

În cazul filtrelor reciproce și fără pierderi, benzile de trecere, respectiv benzile de oprire, sunt definite de domeniile de frecvență pentru care inecuația asociată condiției de propagare este satisfăcută, respectiv nesatisfăcută:

$$0 \leq AD \leq 1. \tag{8.22}$$

În benzile de trecere ale filtrului, constanta de atenuare *a* și constanta de fază *b* se exprimă prin următoarele relații:

$$a = 0, \quad b = arcctg\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{AD}-1}} + k\pi = arccos\sqrt{AD} + k\pi, \tag{8.23}$$

iar în benzile de oprire, aceste mărimi sunt descrise de următoarele relații:

$$a = arg\,c\,tg\frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{AD}}} = \text{argch}\sqrt{AD}, \quad b = \begin{cases} \pm\frac{\pi}{2} & AD \le 0 \\ 0 \text{ sau } 1 & AD \ge 1 \end{cases}. \tag{8.24}$$

În domeniul frecvențelor înalte, capitolul evidențiază importanța parametrilor de împrăștiere (S). Aceștia sunt preferați deoarece, spre deosebire de parametrii (Z), (Y), (T), (H) și (F), nu necesită condiții ideale de scurtcircuit sau circuit deschis la porturi. Parametrii (S) descriu relația dintre undele incidente și undele emergente și pot fi determinați experimental cu ajutorul unui analizor vectorial de rețea.

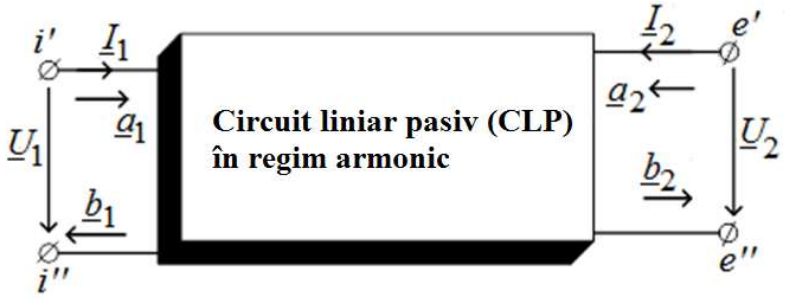


Fig. 8.2. Circuit utilizat pentru definirea parametrilor $\underline{S}$.

Parametrii (S) sunt definiți prin relațiile (8.25)–(8.27). Aceste relații arată legătura dintre undele incidente, undele emergente și mărimile electrice de la intrarea și ieșirea cuadripolului. În rezumat, este suficient să menționăm că relația (8.25) exprimă modelul de bază al parametrilor (S), iar relațiile (8.26) și (8.27) fac legătura cu tensiunile și curenții de la porturi.

Deoarece parametrii $\underline{Z}$, $\underline{Y}$, $\underline{T}$, $\underline{H}$ și $\underline{F}$ sunt dificil de măsurat direct în domeniul frecvențelor înalte, aceștia se exprimă frecvent în funcție de parametrii $\underline{S}$. În acest scop, se pornește de la ecuațiile cuadripolului liniar pasiv formulate în regim armonic prin unde incidente și emergente, conform modelului din figura 8.2 [80-88]:

$$\begin{cases} \underline{b}_1 = \underline{S}_{11}\underline{a}_1 + \underline{S}_{12}\underline{a}_2 \\ \underline{b}_2 = \underline{S}_{21}\underline{a}_1 + \underline{S}_{22}\underline{a}_2' \end{cases} \tag{8.25}$$

unde:

$$\underline{a}_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_1 + Z_0\underline{I}_1\right), \underline{b}_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_1 - Z_0\underline{I}_1\right); \tag{8.26}$$

$$\underline{a}_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_2 + Z_0\underline{I}_2\right), \underline{b}_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_2 - Z_0\underline{I}_2\right).$$

Substituind ecuațiile (7.26) în ecuațiile (7.25) se obțin următoarele ecuații:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_1 - Z_0\underline{I}_1\right) = \underline{S}_{11}\cdot\frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_1 + Z_0\underline{I}_1\right) + \underline{S}_{12}\cdot\frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_2 + Z_0\underline{I}_2\right) \\ \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_2 - Z_0\underline{I}_2\right) = \underline{S}_{21}\cdot\frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_1 + Z_0\underline{I}_1\right) + \underline{S}_{22}\cdot\frac{1}{2\sqrt{Z_0}}\left(\underline{U}_2 + Z_0\underline{I}_2\right). \end{cases} \quad (8.27)$$

Ecuațiile (8.27) descriu cuadripolul liniar pasiv din figura 8.1 în termenii parametrilor S, evidențiind legătura dintre variabilele de la intrare, $\underline{U}_1$ și $\underline{I}_1$, și cele de la ieșire, $\underline{U}_2$ și $\underline{I}_2$.

Capitolul prezintă apoi generarea automată a funcțiilor de transfer. Pentru circuitele liniare, invariante în timp și cu parametri concentrați, analiza simbolică permite obținerea funcțiilor de transfer în formă complet simbolică, parțial simbolică sau numerică. Relația (8.28) definește principalele funcții de transfer utilizate: impedanța de transfer, admitanța de transfer, factorul de transfer în tensiune și factorul de transfer în curent.

Funcţiile de transfer se definesc astfel:

$$Z_{ei} \stackrel{d}{=} \frac{U_e(s)}{J_i(s)},\ Y_{ei} \stackrel{d}{=} \frac{I_e(s)}{E_i(s)},\ A_{ei} \stackrel{d}{=} \frac{U_e(s)}{E_i(s)} \text{ şi } B_{ei} \stackrel{d}{=} \frac{I_e(s)}{J_i(s)}. \quad (8.28)$$

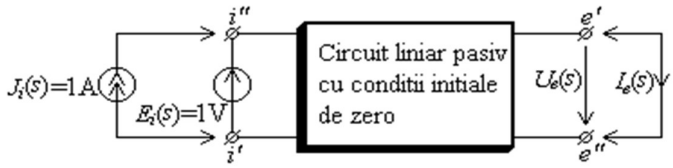


Fig. 8.3. Definirea celor patru tipuri de surse comandate.

Figura 8.3 este utilă pentru a explica modul în care se obțin funcțiile de transfer prin aplicarea unei excitații unitare și observarea răspunsului circuitului.

Pentru determinarea impedanței sau admitanței de intrare se utilizează structura diportului intrare–ieșire din figura 8.4.a, respectiv figura 8.4.b. În mod analog, se poate construi configurația necesară calculului impedanței sau admitanței de ieșire.

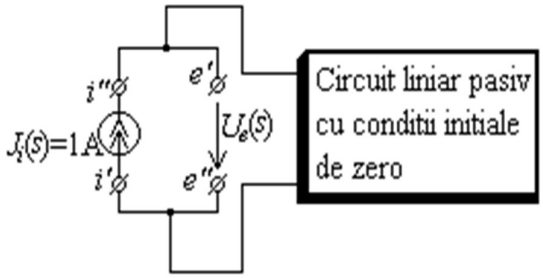


Fig. 8.4, a. Definirea impedanţei de intrare $Z_{ii}(s)$.

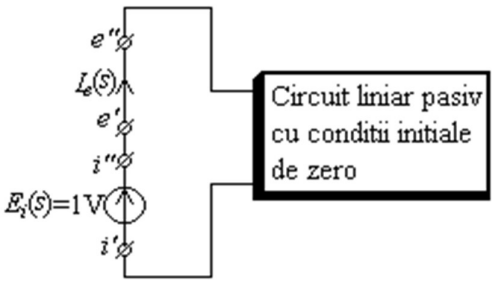


Fig. 8.4, b. Definirea admitanţei de intrare $Y_{ii}(s)$.

Pentru generarea funcțiilor de transfer și a parametrilor circuitelor sunt utilizate programele CSAP și TFSYG, dezvoltate pentru analiza simbolică a circuitelor analogice. Aceste programe permit formularea automată a ecuațiilor nodale modificate, generarea funcțiilor de transfer, calculul polilor și zerourilor, determinarea modulului și argumentului funcției de transfer și analiza sensibilităților.

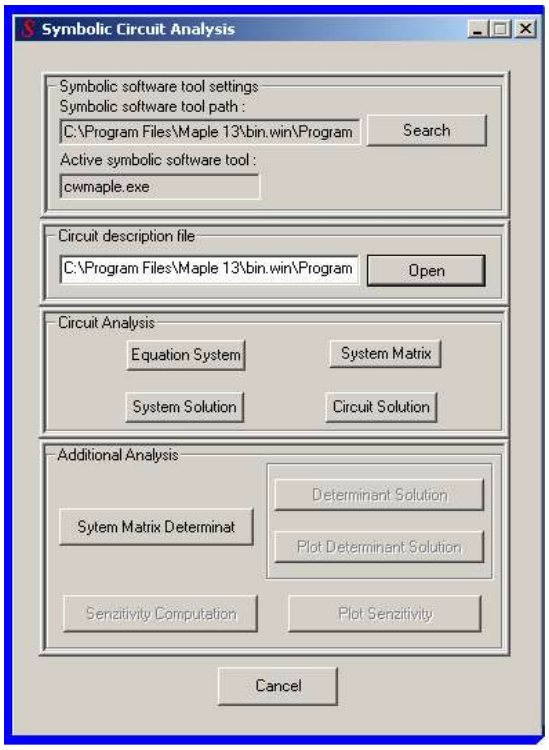


Fig. 8.5. Fereastră de utilizare a programului CSAP.

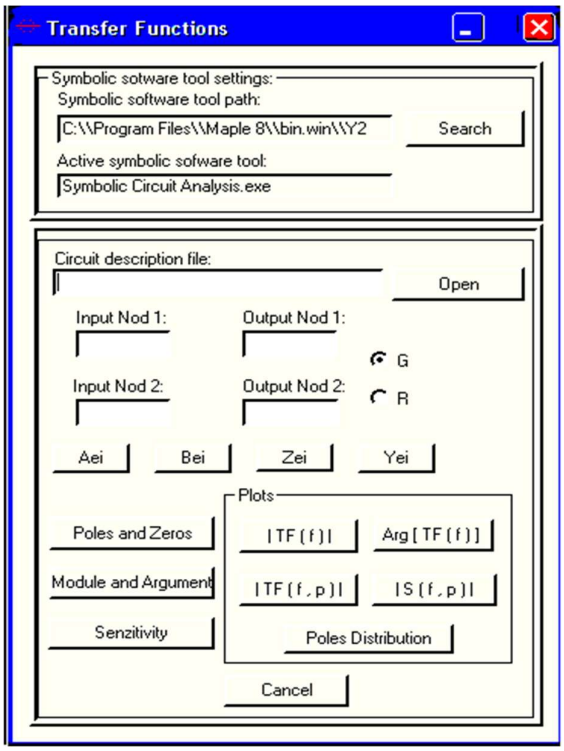


Fig. 8.6. Fereastra de utilizare a programului TFSYG .

Aceste două figuri demonstrează că analiza nu rămâne doar la nivel teoretic, ci este implementată prin programe de calcul.

Un element important al capitolului este conversia între diferite seturi de parametri ai cuadripolilor. În practică, nu este întotdeauna necesar să se determine direct toți parametrii. Se calculează mai întâi parametrii care se obțin mai simplu prin funcții de transfer, iar apoi ceilalți parametri se determină prin relații de conversie. Aceste relații sunt sintetizate în Tabelul 8.1, care prezintă transformările dintre parametrii (T), (Z), (Y), (H), (F) și (S).

Tabelul 8.1. Relații între parametrii circuitelor analogice biport

$T_inv := \begin{bmatrix} \frac{D}{-1.BC+DA} & -\frac{1.B}{-1.BC+DA} \\ -\frac{1.C}{-1.BC+DA} & \frac{A}{-1.BC+DA} \end{bmatrix}$	$Z_T := \begin{bmatrix} \frac{A}{C} & -\frac{1.(AD-1.BC)}{C} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1.D}{C} \end{bmatrix}$
$Y_T := \begin{bmatrix} \frac{D}{B} & -\frac{1.(-1.BC+DA)}{B} \\ \frac{1}{B} & -\frac{1.A}{B} \end{bmatrix}$	$H_T := \begin{bmatrix} \frac{B}{D} & \frac{-1.BC+DA}{D} \\ \frac{1}{D} & -\frac{1.C}{D} \end{bmatrix}$

$$F_T := \begin{bmatrix} \frac{C_complex}{A} & \frac{1.\left(A\ D_complex - B\ C_complex\right)}{A} \\ \frac{1.}{A} & -\frac{1.\ B}{A} \end{bmatrix}$$

$$S11_T := \frac{A\ Z0 + B - 1.\ C_complex\ Z0^2 - 1.\ Z0\ D_complex}{C_complex\ Z0^2 + Z0\ D_complex + A\ Z0 + B}$$

$$S12_T := \frac{2.\ Z0\ (A\ D_complex - 1.\ B\ C_complex)}{C_complex Z0^2 + Z0\ D_complex + A\ Z0 + B}$$

$$S21_T := \frac{2.\ Z0}{C_complex\ Z0^2 + Z0\ D_complex + A\ Z0 + B}$$

$$S22_T := -\frac{1.\ (C_complex Z0^2 - 1.\ Z0\ D_complex + A\ Z0 - 1.\ B}{C_complex Z0^2 + Z0\ D_complex + A\ Z0 + B}$$

$$A_S := -\frac{0.5000\ (S11\ S22 - 1.\ S11 - 1.\ S21\ S12 + S22 - 1.)}{S21}$$

$$B_S := -\frac{0.5000\ Z0\ (S11\ S22 + S11 - 1.\ S21\ S12 + S22 + 1.)}{S21}$$

$$C_S := \frac{0.5000\ (S11\ S22 - 1.\ S22 - 1.\ S11 + 1. - 1.\ S21\ S12)}{S21\ Z0}$$

$$D_S := \frac{0.5000\ (S11\ S22 - 1.\ S22 + S11 - 1. - 1.\ S21\ S12)}{S21}$$

$$Z11_S := -\frac{1.\ Z0(-1.\ S12S21 + S22S11 + S22 - 1.\ S11 - 1.)}{-1.\ S12S21 + S22S11 - 1.\ S22 - 1.\ S11 + 1.}$$

$$Z12_S := -\frac{2.\ Z0\ S12}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 - 1.\ S11 +}$$

$$Z21_S := \frac{2.\ Z0\ S21}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 - 1.\ S11 + 1.}$$

$$Z22_S := \frac{Z0\ (S11 - 1.\ S22 - 1. - 1.\ S12\ S21 + S22\ S11)}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 - 1.\ S11 + 1.}$$

$$Y11_S := -\frac{1.\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S11 - 1.\ S22 - 1.)}{Z0\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 + S11 + 1.)}$$

$$Y12_S := -\frac{2.\ S12}{Z0\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 + S11 + 1.)}$$

$$Y21_S := \frac{2.\ S21}{Z0\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 + S11 + 1.)}$$

$$Y22_S := \frac{-1.\ S11 + S22 - 1. - 1.\ S12\ S21 + S22\ S11}{Z0\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 + S11 + 1.)}$$

$$H11_S := -\frac{1.\ Z0\ (S22\ S11 - 1.\ S12\ S21 + S22 + S11 + 1.)}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 + S11 - 1.}$$

$$H12_S := -\frac{2.\ S12}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 + S11 - 1.}$$

$$H21_S := -\frac{2.\ S21}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 + S11 - 1.}$$

$$H22_S := \frac{S22\ S11 + 1. - 1.\ S11 - 1.\ S12\ S21 - 1.\ S22}{(-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S22 + S11 - 1.)\ Z0}$$

$$F11_S := -\frac{1.\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 - 1.\ S11 - 1.\ S22 + 1.)}{Z0\ (-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 - 1.\ S11 - 1.)}$$

$$F12_S := -\frac{2.\ S12}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 - 1.\ S11 - 1.}$$

$$F21_S := -\frac{2.\ S21}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 - 1.\ S11 - 1.}$$

$$F22_S := \frac{Z0\ (S11 + 1. - 1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22)}{-1.\ S12\ S21 + S22\ S11 + S22 - 1.\ S11 - 1.}$$

$$S11_T := -\frac{1.\ (F11\ F22\ Z0 - F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 - F22 + Z0)}{F11\ F22\ Z0 - F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 + F22 - Z0}$$

$$S12_T := -\frac{2.\ F12\ Z0}{F11\ F22\ Z0 - F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 + F22 - Z0}$$

$$S21_T := -\frac{2.\ F21\ Z0}{F11\ F22\ Z0 - F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 + F22 - Z0}$$

$$S22_T := \frac{1.\ (F11\ F22\ Z0 + F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 + F22 + Z0)}{F11\ F22\ Z0 - F11\ Z0^2 - F12\ F21\ Z0 + F22 - Z0}$$

$$Z_Y := \begin{bmatrix} \frac{Y22}{Y11Y22 - 1.\ Y21Y12} & -\frac{1.\ Y12}{Y11Y22 - 1.\ Y21Y12} \\ -\frac{1.\ Y21}{Y11Y22 - 1.\ Y21Y12} & \frac{Y11}{Y11Y22 - 1.\ Y21Y12} \end{bmatrix}$$

$$Y_Z := \begin{bmatrix} \frac{Z22}{Z11\ Z22 - 1.\ Z21\ Z12} & -\frac{1.\ Z12}{Z11\ Z22 - 1.\ Z21\ Z12} \\ -\frac{1.\ Z21}{Z11\ Z22 - 1.\ Z21\ Z12} & \frac{Z11}{Z11\ Z22 - 1.\ Z21\ Z12} \end{bmatrix}$$

$$T_Y := \begin{bmatrix} -\frac{1.\ Y22}{Y21} & \frac{1}{Y21} \\ -\frac{1.\ (Y11\ Y22 - 1.\ Y12\ Y21)}{Y21} & \frac{Y11}{Y21} \end{bmatrix}$$

$$T_Z := \begin{bmatrix} \frac{Z11}{Z21} & -\frac{1.\ (Z11\ Z22 - 1.\ Z12\ Z21)}{Z21} \\ \frac{1}{Z21} & -\frac{1.\ Z22}{Z21} \end{bmatrix}$$

$$T_H := \begin{bmatrix} -\frac{1.\ (H11\,H22 - 1.\,H12\,H21)}{H21} & \frac{H11}{H21} \\ -\frac{1.\,H22}{H21} & \frac{1}{H21} \end{bmatrix}$$

$$T_F := \begin{bmatrix} \frac{1}{F21} & -\frac{1.\ F22}{F21} \\ \frac{F11}{F21} & -\frac{1.\ (F11\ F22 - 1.\ F12\ F21)}{F21} \end{bmatrix}$$

$$H_Z := \begin{bmatrix} \frac{Z11\ Z22 - 1.\ Z12\ Z21}{Z22} & \frac{Z12}{Z22} \\ -\frac{1.\ Z21}{Z22} & \frac{1}{Z22} \end{bmatrix}$$

$$F_Z := \begin{bmatrix} \frac{1}{Z11} & -\frac{1.\ Z12}{Z11} \\ \frac{Z21}{Z11} & \frac{Z11\ Z22 - 1.\ Z21\ Z12}{Z11} \end{bmatrix}$$

$$S11_Z := -\frac{1.\ (-1.\ Z12\ Z21 - 1.\ Z22\ Z0 + Z22\ Z11 + Z0^2 - 1.\ Z0\ Z1}{Z12\ Z21 - 1.\ Z22\ Z11 - 1.\ Z22\ Z0 + Z0\ Z11 + Z0^2}$$

$$S12_Z := -\frac{2.\ Z12\ Z0}{Z12\ Z21 - 1.\ Z22\ Z11 - 1.\ Z22\ Z0 + Z0\ Z11 + Z0^2}$$

$$S21_Z := \frac{2.\ Z0\ Z21}{Z12\ Z21 - 1.\ Z22\ Z11 - 1.\ Z22\ Z0 + Z0\ Z11 + Z0^2}$$

$$S22_Z := -\frac{1.\ (Z0\ Z11 + Z22\ Z0 + Z0^2 - 1.\ Z12\ Z21 + Z22\ Z11)}{Z12\ Z21 - 1.\ Z22\ Z11 - 1.\ Z22\ Z0 + Z0\ Z11 + Z0^2}$$

$$S11_Y := -\frac{1.\ (-1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11 - 1.\ Y11\ Z0 - 1.\ Y22\ Z0 + 1.)}{-1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11 + Y22\ Z0 - 1.\ Y11\ Z0 - 1.}$$

$$S12_Y := \frac{2.\ Y12\ Z0}{-1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11 + Y22\ Z0 - 1.\ Y11\ Z0 - 1.}$$

$$S21_Y := -\frac{2.\ Y21\ Z0}{-1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11 + Y22\ Z0 - 1.\ Y11\ Z0 - 1.}$$

$$S22_Y := -\frac{1.\ (Y11\ Z0 + Y22\ Z0 + 1. - 1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11)}{-1.\ Y12\ Z0^2\ Y21 + Y22\ Z0^2\ Y11 + Y22\ Z0 - 1.\ Y11\ Z0 - 1.}$$

Tabelul 8.1 este important deoarece reprezintă baza matematică pentru conversia între diferitele descrieri ale aceluiași circuit.

În partea aplicativă, capitolul prezintă două exemple de filtre trece-bandă de tip (m). Primul exemplu este filtrul din figura 8.7, pentru care se generează parametrii fundamentali (A), (B), (C) și (D), apoi se determină parametrii (Z), (Y), (H), (F) și (S). Matricea parametrilor fundamentali este prezentată prin relația (8.29), iar matricile (Z), (Y), (H), (F) și (S) sunt prezentate prin relațiile (8.30)–(8.34).

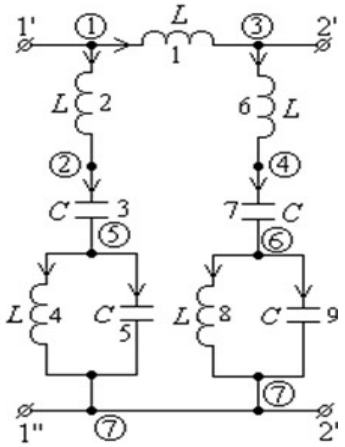


Fig. 8.7. Filtru trece-bandă de tip *m*.

Deoarece este verificată relația: *A*D - B*C* = 1 și simetric pentru că *A* = *D*.

Matricea operațională ***T*** a parametrilor de transfer (fundamentali) are structura:

$$T := \begin{bmatrix} \dfrac{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.}{s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.} & s\,L \\ \dfrac{s\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,C}{1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L} & \dfrac{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.}{s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.} \end{bmatrix}. \tag{8.29}$$

Matricea Z a impedanţele operaționale de transfer:

Matricea ***Z*** a impedanțelor operaționale de transfer, calculată în funcție de parametrii fundamentali *A, B*, C și *D* (vezi Tabelul 8.1), are forma:

$$Z := \begin{bmatrix} \dfrac{(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)\,(2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.)}{C\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,s}, \\ -\dfrac{1.\,(1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L)}{s\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,C} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dfrac{1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L}{s\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,C}, \\ -\dfrac{1.\,(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)\,(2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.)}{C\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,s} \end{bmatrix}. \tag{8.30}$$

Se remarcă faptul că $Z_{11} = -Z_{22}$ şi $Z_{12} = -Z_{21}$, ceea ce arată că circuitul (cuadripolul) din figura 8.7 este simetric.

Matricea Y a admitanţele operaționale de transfer:

Conform relației din Tabelul 1 expresia matricei admitanțelor operaționale $\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$ în funcție de parametrii *A*, *B*, *C* și *D* este:

$$Y_T := \begin{bmatrix} \dfrac{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.}{(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)\,s\,L} & -\dfrac{1.}{s\,L} \\ \dfrac{1}{s\,L} & -\dfrac{1.\,(2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.)}{(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)\,s\,L} \end{bmatrix}. \tag{8.31}$$

Se poate observa faptul că $Y_{11} = -Y_{22}$ şi $Y_{12} = -Y_{21}$, ceea ce arată că circuitul (cuadripolul) din figura 8.7 este simetric.

*Matricea **H** a parametrilor hibrizi operaționali:*

Matricea în operațional a parametrilor hibrizi ***H*** se poate calcula, conform relației (vezi Tabelul 8.1), în funcție de parametrii fudamentali *A*, *B*, *C* și *D* și are expresia:

$$H := \begin{bmatrix} \dfrac{(-1.\,M^2\,C1 + C1\,L1\,L2)\,s^3 + (C1\,L1\,RL2 + C1\,RL1\,L2)\,s^2 + (L2 + C1\,RL1\,RL2)\,s + RL2}{s\,C1\,(RL2 + s\,L2)}, & \dfrac{1.\,s\,M}{RL2 + s\,L2} \\ \dfrac{s\,M}{RL2 + s\,L2}, & -\dfrac{s\,C2\,RL2 + 1. + s^2\,C2\,L2}{RL2 + s\,L2} \end{bmatrix} \tag{8.32}$$

Din relația (8.32) se constată că $H_{12} = H_{21}$.

Matricea ***F,*** în operațiunal, a parametrilor hibrizi inverși este*:*

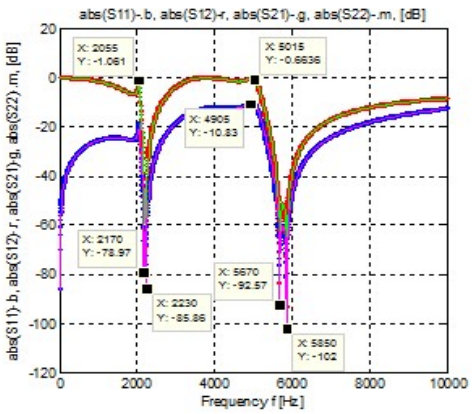
$$F := \begin{bmatrix} \dfrac{C\,(3.\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^2\,C\,L + 2.)\,s}{(2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.)\,(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)} & \dfrac{s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.}{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.} \\ \dfrac{s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.}{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.} & -\dfrac{1.\,s\,L\,(s^4\,C^2\,L^2 + 3.\,s^2\,C\,L + 1.)}{2.\,s^4\,C^2\,L^2 + 4.\,s^2\,C\,L + 1.} \end{bmatrix} \tag{8.33}$$

Din relația (8.33) se constată că $F_{12} = F_{21}$. det_F= -1.

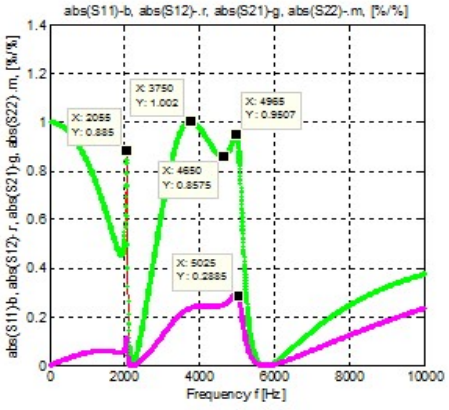
Matricea parametrilor S (de împrăștiere) $\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$se exprimă în funcție de matricea $\boldsymbol{T}$ prin expresia (vezi Tabelul 8.1):

$$\begin{aligned} S_T := \; & [-1.\,(-1.\,s\,L + C\,Z0^2)\,(1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L) \,/\, (s^9\,L^5\,C^4 + 4.\,Z0\,s^8\,C^4\,L^4 \\ & + 3.\,s^7\,C^4\,Z0^2\,L^3 + 6.\,s^7\,L^4\,C^3 + 20.\,Z0\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^5\,C^3\,Z0^2\,L^2 + 11.\,s^5\,L^3\,C^2 + 30.\,Z0\,s^4\,C^2\,L^2 \\ & + 9.\,s^3\,C^2\,Z0^2\,L + 6.\,s^3\,L^2\,C + 14.\,Z0\,s^2\,C\,L + 2.\,s\,C\,Z0^2 + s\,L + 2.\,Z0)\,, -2. \\ & (1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L)\,Z0 \,/\, (s^9\,L^5\,C^4 + 4.\,Z0\,s^8\,C^4\,L^4 + 3.\,s^7\,C^4\,Z0^2\,L^3 \\ & + 6.\,s^7\,L^4\,C^3 + 20.\,Z0\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^5\,C^3\,Z0^2\,L^2 + 11.\,s^5\,L^3\,C^2 + 30.\,Z0\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^3\,C^2\,Z0^2\,L \\ & + 6.\,s^3\,L^2\,C + 14.\,Z0\,s^2\,C\,L + 2.\,s\,C\,Z0^2 + s\,L + 2.\,Z0)] \\ & [2.\,(1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L)\,Z0 \,/\, (s^9\,L^5\,C^4 + 4.\,Z0\,s^8\,C^4\,L^4 + 3.\,s^7\,C^4\,Z0^2\,L^3 \\ & + 6.\,s^7\,L^4\,C^3 + 20.\,Z0\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^5\,C^3\,Z0^2\,L^2 + 11.\,s^5\,L^3\,C^2 + 30.\,Z0\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^3\,C^2\,Z0^2\,L \\ & + 6.\,s^3\,L^2\,C + 14.\,Z0\,s^2\,C\,L + 2.\,s\,C\,Z0^2 + s\,L + 2.\,Z0)\,, -1.\,(-1.\,s\,L + C\,Z0^2) \end{aligned} \tag{8.34}$$

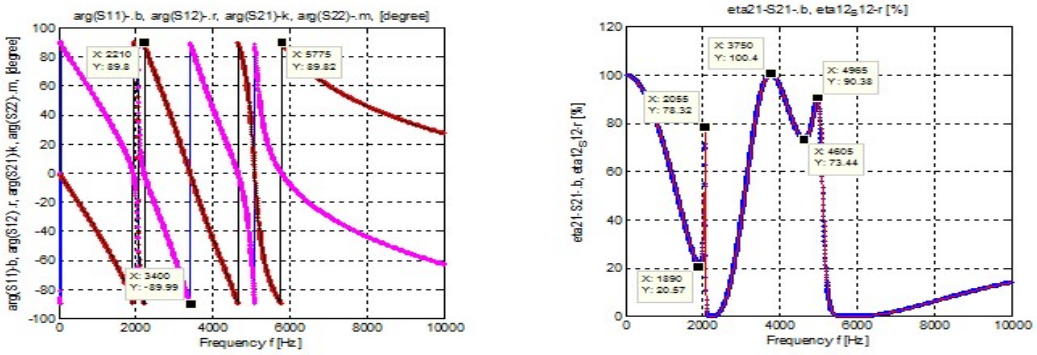
$$(1. + s^8\,C^4\,L^4 + 6.\,s^6\,C^3\,L^3 + 11.\,s^4\,C^2\,L^2 + 6.\,s^2\,C\,L) \,/\, (s^9\,L^5\,C^4 + 4.\,Z0\,s^8\,C^4\,L^4 + 3.\,s^7\,C^4\,Z0^2\,L^3 + 6.\,s^7\,L^4\,C^3 + 20.\,Z0\,s^6\,C^3\,L^3 + 10.\,s^5\,C^3\,Z0^2\,L^2 + 11.\,s^5\,L^3\,C^2 + 30.\,Z0\,s^4\,C^2\,L^2 + 9.\,s^3\,C^2\,Z0^2\,L + 6.\,s^3\,L^2\,C + 14.\,Z0\,s^2\,C\,L + 2.\,s\,C\,Z0^2 + s\,L + 2.\,Z0)]$$



(a)



(b)



(c) (d)

Fig. 8.8. Variațiile cu frecvența ale modulelor parametrilor $\underline{S}$ și ale randamentelor de transmitere a semnalelor pentru filtrul din figura 8.7: a) Modulele exprimate în [dB]; b) Modulele exprimate în [%/%]; c) Argumentele parametrilor $\underline{S}$; d) Randamentele de transmitere a semnalelor de la intrare la ieșire η_{21_S21} și de la ieșire la intrare η_{12_S12}.

Figura 8.8 arată rezultatele obținute după generarea parametrilor. Ea include modulele parametrilor (S), argumentele acestora și randamentele de transmitere directă și inversă. Din această figură se observă că randamentele de transmitere în cele două sensuri au variații identice în funcție de frecvență, ceea ce confirmă comportarea simetrică a circuitului.

Pentru filtrul din figura 8.7, impedanțele caracteristice și impedanțele imagine sunt calculate cu relațiile (8.35)–(8.38). Variațiile acestora în funcție de frecvență sunt prezentate în figura 8.9. Din analiza figurii rezultă că (Z_c1 = Z_c2) și (Z_i1 = Z_i2), ceea ce confirmă caracterul simetric al cuadripolului.

Pentru valorile numerice ale parametrilor circuitului din figura 8.7: Z_0 = 50.0 Ω, L =0.001 H, C=0.000002 F și utilizând relațiile (8.15) și (8.16) se calculează expresiile impedanțelor caracteristice (relațiile (8.15)) și, impedanțele imagine (relațiile (8.16)) în funcție de frecvență**,** după cum urmează.

Impedanța caracteristică (iterativă) de la poarta de intrare 1' -1":

$$Zc1_f := -60400.\ I\sqrt{-\frac{0.1371\ 10^{-6} f^2 \left(-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.\right)}{1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2}} \qquad (8.35)$$
$$\left(1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2\right) \Big/ (f$$
$$\left(-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.\right))$$

Impedanța caracteristică (iterativă) de la poarta de ieșire 2' -2":

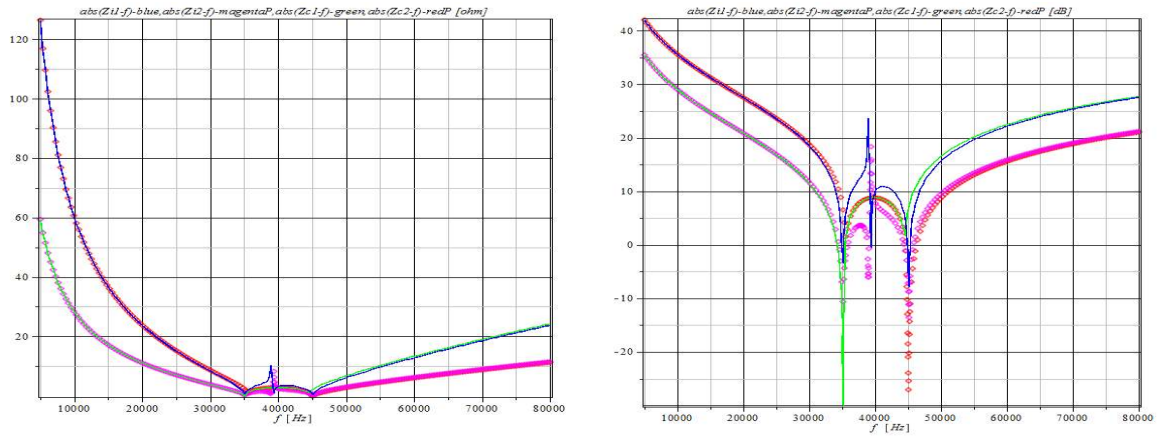
$$Zc2_f := -60400.\ I\sqrt{-\frac{0.1371\ 10^{-6} f^2 \left(-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.\right)}{1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2}} \qquad (8.36)$$
$$\left(1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2\right) \Big/ (f$$
$$\left(-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.\right))$$

Impedanța imagine de la poarta de intrare 1' -1":

$$Zi1_f := 22.36\sqrt{\frac{1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2}{-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.}} \tag{8.37}$$

Impedanța imagine de la poarta de ieșire 2' -2":

$$Zi2_f := 22.36\sqrt{\frac{1. + 0.3534\ 10^{-27} f^8 - 0.1546\ 10^{-19} f^6 + 0.2068\ 10^{-12} f^4 - 0.8228\ 10^{-6} f^2}{-0.7733\ 10^{-20} f^6 + 0.1880\ 10^{-12} f^4 - 0.1234\ 10^{-5} f^2 + 2.}} \tag{8.38}$$



(a) (b)

Fig. 8.9. Variațiile cu frecvența ale modulelor: a) abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$)-blue, abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$)-magentaP, abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$)-green și abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$)-redP; b) 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$))-blue, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$))-magentaP, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$))-green și 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$)).

Figura 8.9 este evidențiat caracterul simetric al circuitului.

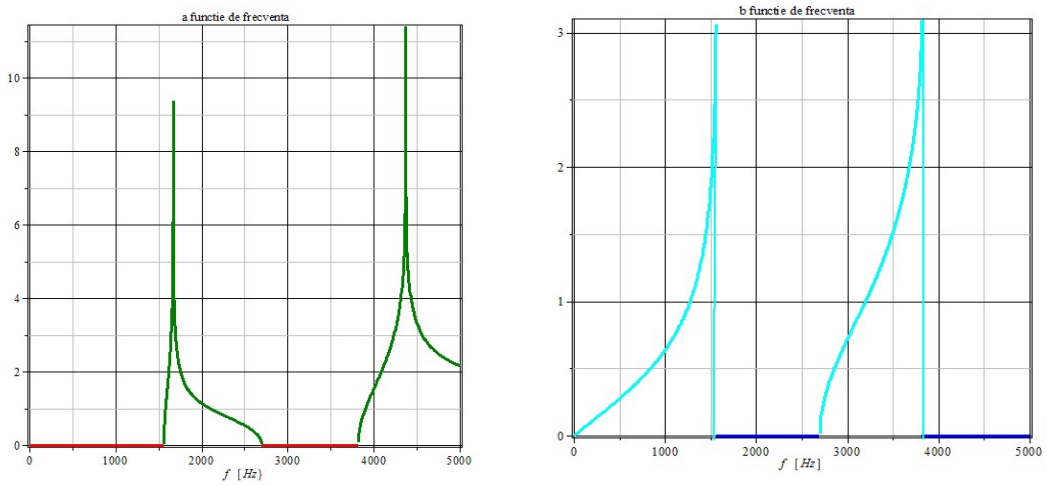
Benzile de trecere și de oprire sunt determinate pe baza condiției de propagare și a expresiei parametrului (A). Constanta de atenuare și constanta de fază sunt calculate cu relațiile (8.23) și (8.24) și sunt reprezentate grafic în figura 8.10. Această figură confirmă că filtrul analizat este un filtru trece-bandă de tip (m).

În benzile de trecere ale filtrului, constanta de atenuare a și constanta de fază b se exprimă prin următoarele relații:

$$a = 0, \quad b = arcctg\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{AD}-1}} + k\pi = arccos\sqrt{AD} + k\pi, \tag{8.23}$$

iar în benzile de oprire, aceste mărimi sunt descrise de următoarele relații:

$$a = arg\,c\,tg\frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{AD}}} = \text{argch}\sqrt{AD}, \quad b = \begin{cases} \pm\frac{\pi}{2} & AD \le 0 \\ 0 \text{ sau } 1 & AD \ge 1 \end{cases}. \tag{8.24}$$



(a) (b)

Fig. 8.10. Variațiile cu frecvența ale: a) Constantei de atenuare; b) Constantei de fază.

Figurile 8.10, a și b confirmă că filtrul liniar pasiv din figura 8.7 este un filtru trece bandă tip *m*. Evident, având generați parametrii fundamentali *A*, *B*, *C* și *D*, toate mărimile caracteristice ale unui cuadripol liniar pasiv pot fi calculate.

Al doilea exemplu este filtrul trece-bandă de tip (m) din figura 8.11. Pentru acesta, se determină din nou parametrii fundamentali și apoi se calculează celelalte seturi de parametri. Relația (8.39) prezintă matricea (T), iar relațiile (8.40)–(8.44) prezintă matricile (Z), (Y), (H), (F) și (S).

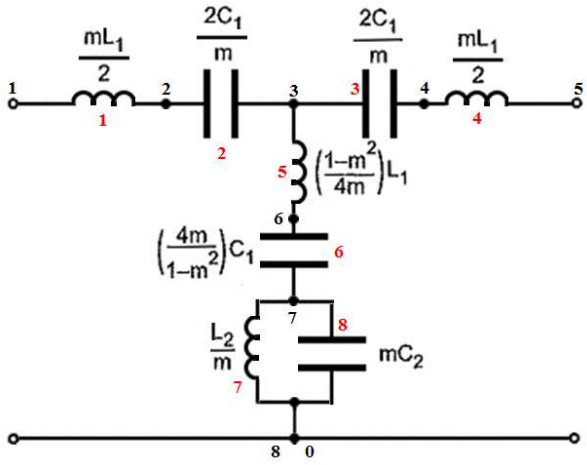


Fig. 8.11. Filtru trece bandă de tip *m*.

Deoarece este verificata relatia: *A*D - B*C* = 1 filtrul din figura 8.11 este reciproc și simetric pentru că *A* = *D*.

Matricea ***T_f*** a parametrilor de transfer (fundamentali), în funcție de frecvență, are structura:

$$T_f := \left[\left[-\frac{1.\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.620\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right)}{-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.634\ 10^{-8} f^2 - 0.75}, \right.\right.$$
$$\left(79600.\ \mathrm{I}\left(-3.944\ 10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\ 10^{-17} f^4\right.\right.$$
$$\left.\left. - 5.127\ 10^{-8} f^2\right)\right) \Big/ \left(\left(-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.634\ 10^{-8} f^2\right.\right.$$
$$\left.\left. - 0.75\right) f\right) \Big], \quad (8.39)$$
$$\left[-\frac{0.00001256\ \mathrm{I}\, f\left(-1.578\ 10^{-8} f^2 + 1.\right)}{-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.634\ 10^{-8} f^2 - 0.75}, \right.$$
$$\left. \left. -\frac{1.\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.620\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right)}{-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.634\ 10^{-8} f^2 - 0.75} \right] \right]$$

Matricea Z a impedanţele complexe de transfer, în funcție de frecvență:

Matricea $\boldsymbol{Z}$ a impedanțelor complexe de transfer, calculate în funcție de parametrii fundamentali *A, B*, *C* și *D* (vezi Tabelul 8.1), are forma:

$$Z_T_f := \left[\left[-\frac{79600.\ \mathrm{I}\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.621\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right)}{f\left(-1.578\ 10^{-8} f^2 + 1.\right)}, \right.\right.$$
$$\left. -\frac{79600.\ \mathrm{I}\left(-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.635\ 10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{f\left(-1.578\ 10^{-8} f^2 + 1.\right)} \right], \quad (8.40)$$
$$\left[\frac{79600.\ \mathrm{I}\left(-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.635\ 10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{f\left(-1.578\ 10^{-8} f^2 + 1.\right)}, \right.$$
$$\left. \left. -\frac{79600.\ \mathrm{I}\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.621\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right)}{f\left(-1.578\ 10^{-8} f^2 + 1.\right)} \right] \right]$$

Se remarcă faptul că $Z_{11} = Z_{22}$ şi $Z_{12} = -Z_{21}$, ceea ce arată că circuitul (cuadripolul) din figura 8.11 este simetric.

Matricea Y a admitanțelor operaționale de transfer:

Conform relației din Tabelul 8.1 expresia matricei admitanțelor complexe $\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$ în funcție de parametrii *A*, *B*, *C* și *D* este:

$$Y_T_f := \left[\left[\frac{0.00001256\ \mathrm{I}\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.621\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right) f}{\left(-3.944\ 10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\ 10^{-17} f^4 - 5.128\ 10^{-8} f^2\right)}, \right.\right.$$
$$\left. \frac{0.00001256\ \mathrm{I}\, f\left(-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.635\ 10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{\left(-3.944\ 10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\ 10^{-17} f^4 - 5.128\ 10^{-8} f^2\right)} \right], \quad (8.41)$$
$$\left[-\frac{0.00001256\ \mathrm{I}\, f\left(-4.665\ 10^{-17} f^4 + 4.635\ 10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{\left(-3.944\ 10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\ 10^{-17} f^4 - 5.128\ 10^{-8} f^2\right)}, \right.$$
$$\left. \left. -\frac{0.00001256\ \mathrm{I}\left(7.775\ 10^{-17} f^4 - 5.621\ 10^{-8} f^2 + 1.25\right) f}{\left(-3.944\ 10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\ 10^{-17} f^4 - 5.128\ 10^{-8} f^2\right)} \right] \right]$$

Se poate observa faptul că $Y_{11} = -Y_{22}$ şi $Y_{12} = -Y_{21}$, ceea ce arată că circuitul (cuadripolul) din figura 8.11 este simetric.

*Matricea **H** a parametrilor hibrizi:*

Matricea parametrilor hibrizi $\boldsymbol{H}$ se poate calcula, conform relației (vezi Tabelul 8.1), în funcție de parametrii fudamentali *A*, *B*, *C* și *D* și are expresia:

$$H_T_f := \left[\left[-\frac{79600.\,\mathrm{I}\left(-3.944\,10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\,10^{-17} f^4 - 5.128\,10^{-8} f^2\right)}{f\left(7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25\right)},\right.\right.$$
$$\left. -\frac{1.\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25}\right],$$
$$\left[-\frac{1.\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25},\right. \tag{8.42}$$
$$\left.\left. \frac{0.000004186\,\mathrm{I} f\left(-1.578\,10^{-8} f^2 + 1.\right)\left(1. - 157.8 f^2\,C\,L\right)}{\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right)\left(3. - 78.88 f^2\,C\,L\right)} \right]\right]$$

Din relația (7.42) se constată că $H_{12} = H_{21}$.

Matricea ***F,*** în operațiunal, a parametrilor hibrizi inverși este*:*

$$F_T_f := \left[\left[\frac{0.00001256\,\mathrm{I} f\left(-1.578\,10^{-8} f^2 + 1.\right)}{7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25},\right.\right.$$
$$\left. -\frac{1.\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25}\right],$$
$$\left[-\frac{1.0\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right)}{7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25},\right. \tag{8.43}$$
$$\left.\left. \frac{79600.\,\mathrm{I}\left(-3.944\,10^{-9} f^2 + 1.\right)\left(1. + 6.220\,10^{-17} f^4 - 5.128\,10^{-8} f^2\right)}{f\left(7.775\,10^{-17} f^4 - 5.621\,10^{-8} f^2 + 1.25\right)} \right]\right]$$

Din relația (8.43) se constată că $F_{12} = F_{21}$. det_*F*= -1.

Matricea parametrilor *S* (de împrăștiere) $\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$ se exprimă în funcție de matricea ***T*** prin expresia:

$$S_f := \left[\left[\left(0.5000\left(-2.454\,10^{-25} f^6 - 5.956\,10^{-15} f^4 + 3.392\,10^{-7} f^2\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. + 1.\right)\right) \Big/ \left(-1.227\,10^{-25} f^6 - 3.530\,10^{-11}\,\mathrm{I} f^3 + 4.885\,10^{-20}\,\mathrm{I} f^5\right.\right.$$
$$\left.\left. + 3.242\,10^{-15} f^4 + 0.0007850\,\mathrm{I} f - 2.249\,10^{-7} f^2 + 0.5\right),$$
$$\left(0.0006280\,\mathrm{I}\left(-4.665\,10^{-17} f^4 + 4.635\,10^{-8} f^2 - 0.75\right) f\right) \Big/ \left(\right.$$
$$-1.227\,10^{-25} f^6 - 3.530\,10^{-11}\,\mathrm{I} f^3 + 4.885\,10^{-20}\,\mathrm{I} f^5 + 3.242\,10^{-15} f^4$$
$$\left. + 0.0007850\,\mathrm{I} f - 2.249\,10^{-7} f^2 + 0.5\right)\Big], \tag{8.44}$$
$$\left[\left(0.0006280\,\mathrm{I}\left(4.665\,10^{-17} f^4 - 4.635\,10^{-8} f^2 + 0.75\right) f\right) \Big/ \left(\right.\right.$$
$$\left.\left. -1.227\,10^{-25} f^6 - 3.530\,10^{-11}\,\mathrm{I} f^3 + 4.885\,10^{-20}\,\mathrm{I} f^5 + 3.242\,10^{-15} f^4\right.\right.$$
$$\left.\left. + 0.0007850\,\mathrm{I} f - 2.249\,10^{-7} f^2 + 0.5\right), \left(0.5000\left(\right.\right.$$
$$\left.\left. -2.454\,10^{-25} f^6 - 5.956\,10^{-15} f^4 + 3.392\,10^{-7} f^2 + 1.\right)\right) \Big/ \left(\right.$$
$$-1.227\,10^{-25} f^6 - 3.530\,10^{-11}\,\mathrm{I} f^3 + 4.885\,10^{-20}\,\mathrm{I} f^5 + 3.242\,10^{-15} f^4$$
$$\left.\left. + 0.0007850\,\mathrm{I} f - 2.249\,10^{-7} f^2 + 0.5\right)\right]\right]$$

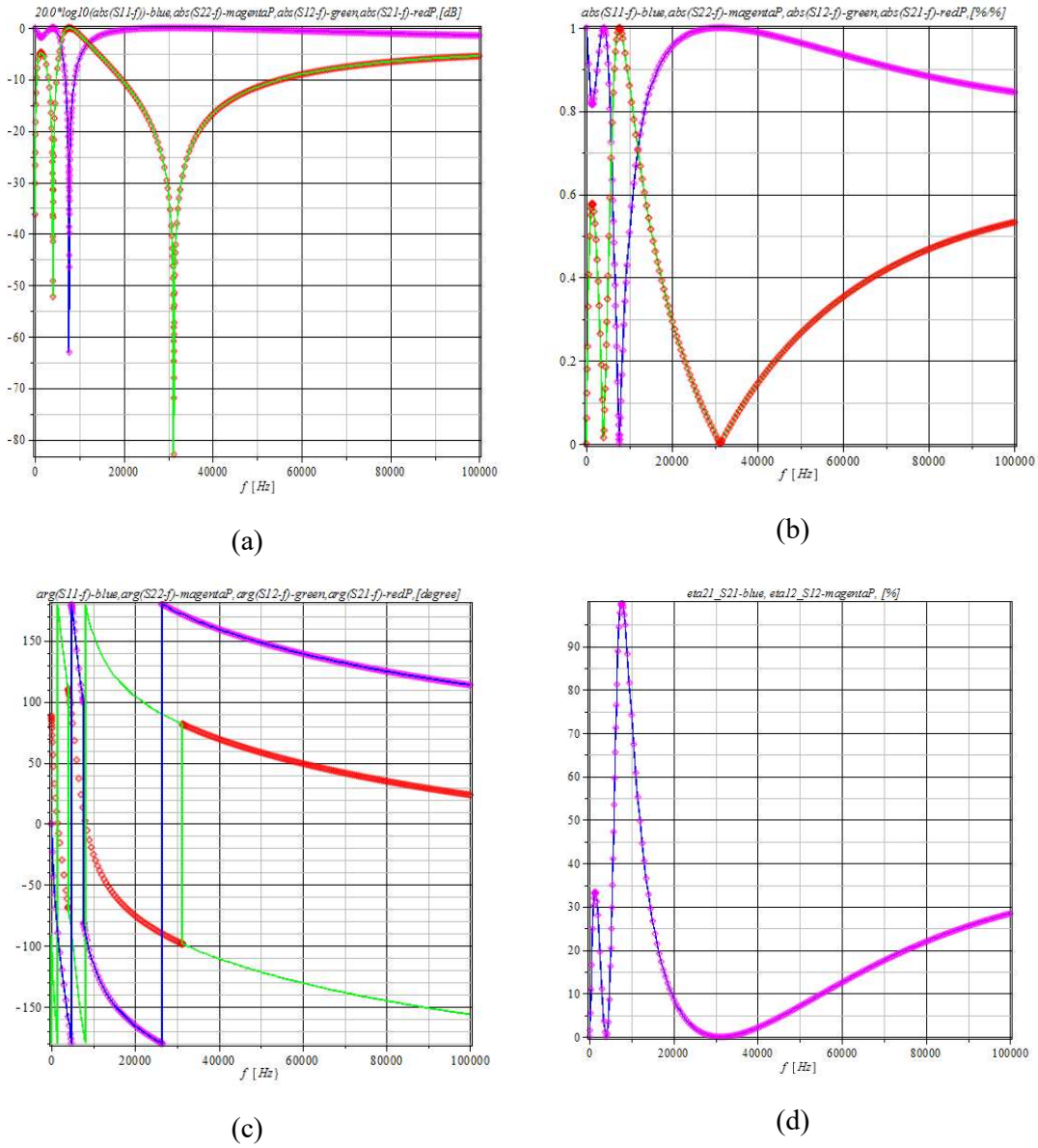
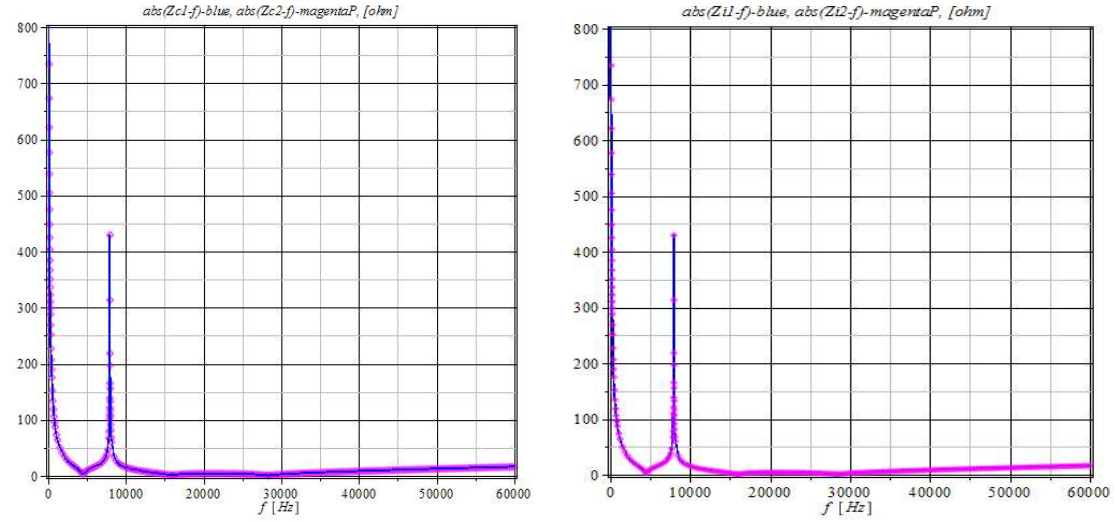


Fig. 8.12. Variațiile cu frecvența ale modulelor parametrilor $\underline{S}$ și ale randamentelor de transmitere a semnalelor pentru filtrul din figura 8.11: a) Modulele exprimate în [dB]; b) Modulele exprimate în [%/%]; c) Argumentele parametrilor $\underline{S}$; d) Randamentele de transmitere a semnalelor de la intrare la ieșire η_{21_S21} și de la ieșire la intrare η_{12_S12}.

Figura 8.12 este una dintre cele mai importante figuri din partea aplicativă. Ea arată cum se modifică parametrii (S) și randamentele de transmitere în funcție de frecvență, permițând interpretarea comportării filtrului.

Pentru filtrul din figura 8.11 sunt calculate impedanțele caracteristice și impedanțele imagine prin relațiile (8.45)–(8.48), iar variațiile lor sunt prezentate în figura 8.13. Ulterior, factorul de transfer în tensiune este determinat prin relațiile (8.49) și (8.50), iar polii și zerourile funcției de transfer sunt prezentați prin relațiile (8.51) și (8.52). Aceste rezultate permit analiza stabilității și comportării dinamice a filtrului.

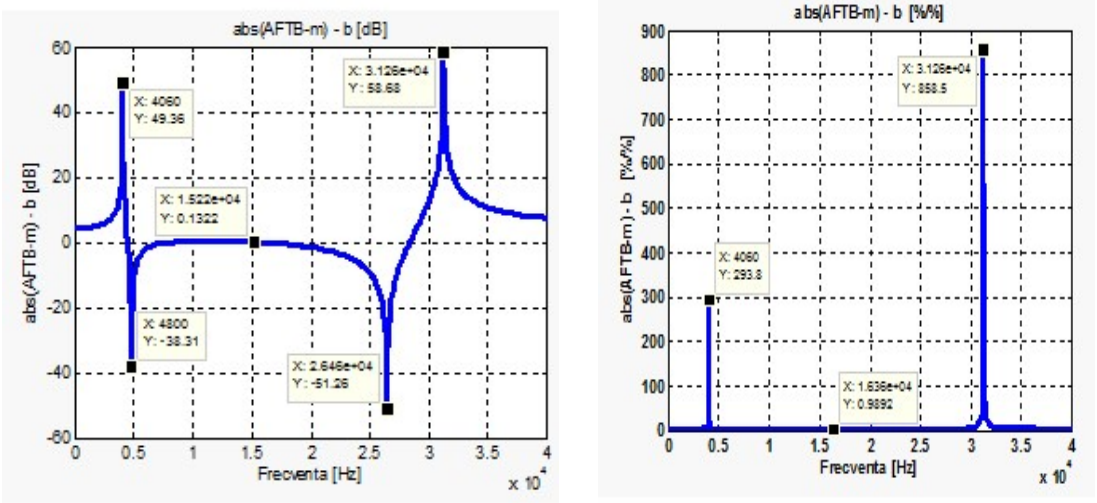
În figura 8.13, a (fig. 8.13, b) s-au prezentat variațiile cu frecvența ale modulelor abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$)-blue, abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$)-magentaP, abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$)-green, abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$)-redP (20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$))-blue, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$))-magentaP, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$))-green, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$))-redP).



(a) (b)

Fig. 8.13. Variațiile cu frecvența ale modulelor: a) abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$)-blue, abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$)-magentaP, abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$)-green și abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$)-redP; b) 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i1\text{-}f}$))-blue, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{i2\text{-}f}$))-magentaP, 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c1\text{-}f}$))-green și 20.0*log10(abs($\underline{Z}_{c2\text{-}f}$)).

În figura 8.14 se redau caracteristicile de frecvență ale filtrului trece bandă de tipul m din figura 8.11, astfel: variația cu frecvența a modulului factorului de transfer (amplificare) în tensiune abs(A_{FTB_m}) exprimat în [dB] – figura 8.14, a și, respectiv exprimat în [V/V] în figura 8.14, b.



$$Q_{AFTB_m1} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{3.126e04 - 4080.0}{1.522e04} = 1.786$$

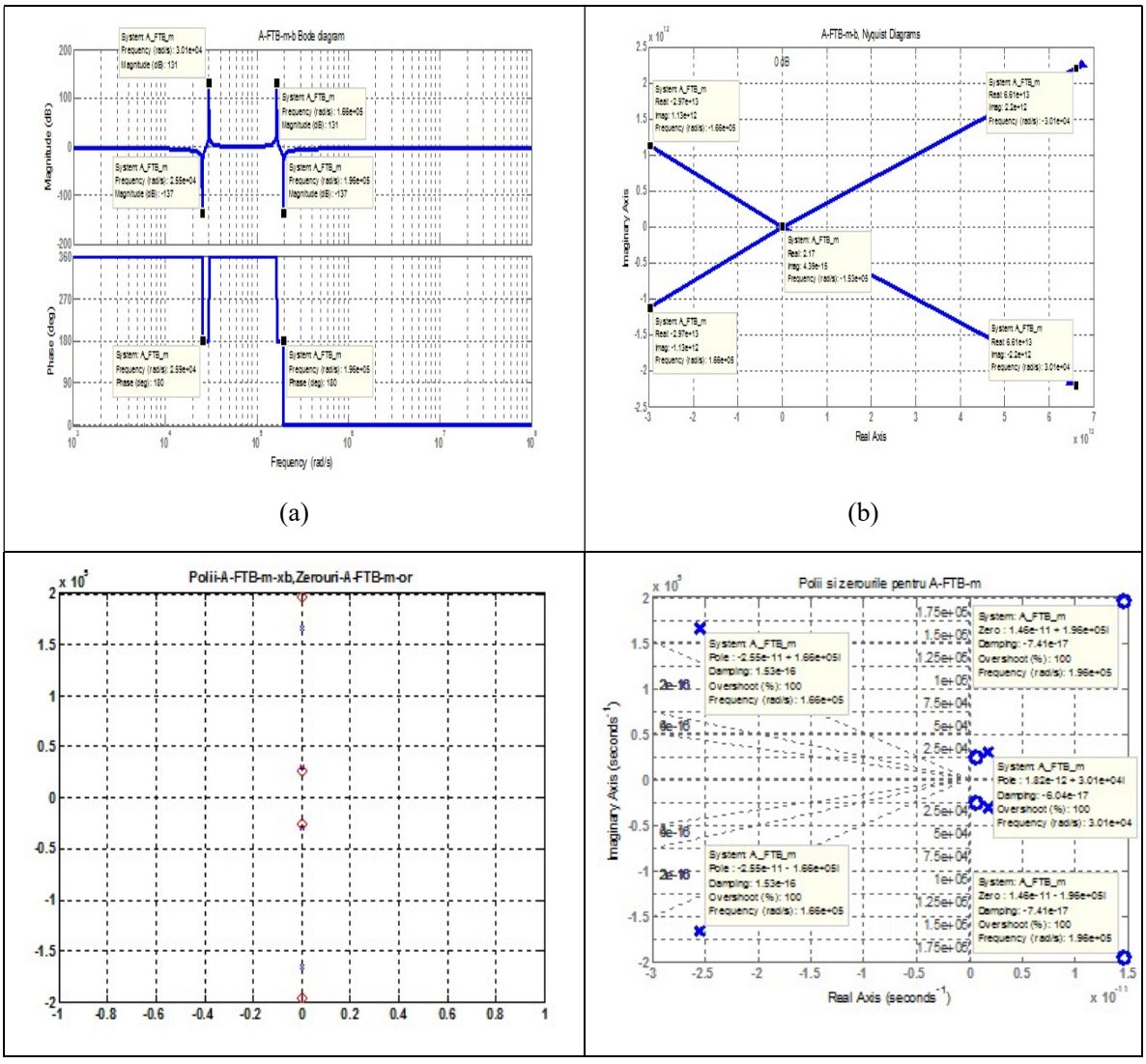
$$Q_{AFTB_m2} = \frac{f_{min\,2} - f_{min\,1}}{f_0} = \frac{2{,}646e04 - 4300.0}{1.522e04} = 1.456$$

(a) (b)

Fig. 8.14. Caracteristicile de frecvență ale filtrului trece bandă de tipul m din figura 8.11, astfel: variația cu frecvența a modulului factorului de transfer (amplificare) în tensiune abs(AFTB_m) exprimat în [dB] – figura 8.14, a și, respectiv exprimat în [V/V] în figura 8.14, b.

Figura 8.14 este foarte potrivită pentru rezumat, deoarece arată răspunsul în frecvență al filtrului, atât în dB, cât și în raport (V/V). Ea face legătura directă între calculele matematice și comportarea vizibilă a filtrului.

Benzile de trecere și de oprire ale filtrului sunt determinate cu ajutorul relațiilor (8.53) și (8.54). Rezultatele arată domeniile de frecvență în care filtrul permite propagarea semnalului și domeniile în care semnalul este atenuat. Variațiile constantei de atenuare și ale constantei de fază sunt prezentate în figura 8.15, iar caracteristicile Bode, Nyquist și reprezentările polilor și zerourilor sunt prezentate în figura 8.16.



(a) (b)

(c)	(d)

Fig. 8.16. Caracteristicile Bode ale filtrului trece bandă din figura 8.11, după cum urmează: a) Diagrama Bode; b) Diagrama Nyquist; c) Reprezentarea polilor și zerourilor în planul complex și d) Polii și zerourile pentru A_{FTB_m}.

Figura 8.16 este foarte utilă deoarece sintetizează comportarea filtrului prin mai multe reprezentări grafice: răspuns Bode, diagramă Nyquist și poziția polilor și zerourilor.

În concluzie, Capitolul 8 arată că parametrii cuadripolilor și funcțiile de transfer reprezintă instrumente importante pentru analiza, proiectarea și diagnosticarea circuitelor electrice. Generarea automată a parametrilor (T), (Z), (Y), (H), (F) și (S), împreună cu relațiile de conversie dintre aceștia, permite evaluarea rapidă a comportării circuitelor în regim armonic sau operațional. Prin exemplele de filtre trece-bandă de tip (m), capitolul demonstrează că metodele simbolice și numerice pot fi folosite pentru identificarea benzilor de trecere și de oprire, a pierderilor, a transmisiei semnalului, a polilor și zerourilor și a stabilității circuitului.

În raport cu tema tezei, acest capitol contribuie la fundamentarea unei abordări moderne de analiză a instalațiilor electrice de joasă tensiune. Prin modelarea circuitelor și prin determinarea parametrilor caracteristici, pot fi identificate regimuri de funcționare necorespunzătoare, pierderi suplimentare, dezechilibre sau comportări dependente de frecvență care pot favoriza suprasarcini, încălziri locale și scăderea fiabilității instalației. Astfel, Capitolul 8 susține ideea că siguranța instalațiilor electrice trebuie evaluată nu doar prin verificări practice, ci și prin instrumente de calcul, simulare și proiectare asistată.

Capitolul 9

Analiza motorului de inducție în regim sinusoidal periodic, luând în considerare caracteristica de magnetizare și variația rezistenței rotorului în funcție de alunecare

Capitolul 9 analizează motorul de inducție ca un consumator important în instalațiile electrice de joasă tensiune. Motoarele asincrone sunt utilizate pe scară largă în aplicații industriale, clădiri tehnice, sisteme de pompare, ventilare, climatizare și acționări electrice, iar regimurile lor de funcționare pot influența semnificativ rețeaua electrică. În special la pornire, la variații de sarcină sau în regimuri neliniare, aceste motoare pot produce curenți mari, încălziri suplimentare, armonici, scăderea factorului de putere și pierderi energetice [95]–[112].

Integrarea acestui studiu în teză este justificată prin faptul că siguranța instalațiilor electrice nu depinde doar de starea cablurilor, tablourilor și protecțiilor, ci și de comportarea consumatorilor alimentați. Un motor de inducție funcționând în regim necorespunzător poate solicita suplimentar circuitele de alimentare, poate produce dezechilibre și poate contribui la apariția

suprasarcinilor sau încălzirilor locale. Din această perspectivă, modelarea motorului ajută la înțelegerea modului în care consumatorii importanți pot influența riscul tehnic al unei instalații electrice de joasă tensiune.

Capitolul pornește de la ideea că regimul periodic nesinusoidal, numit și regim deformant, are efecte perturbatoare asupra rețelelor electrice. În astfel de regimuri, factorul de putere se reduce, compensarea puterii reactive devine dificilă, apar pierderi suplimentare și pot apărea fenomene de rezonanță, supratensiuni sau supracurenți. Aceste efecte sunt importante pentru instalațiile de joasă tensiune, deoarece pot contribui la degradarea echipamentelor și la creșterea solicitărilor termice.

Analiza motorului de inducție este realizată prin două categorii principale de metode: metode în domeniul timpului și metode în domeniul frecvenței. Prima categorie include metoda „shooting”, utilizată pentru determinarea regimului staționar, iar a doua categorie include metoda echilibrului armonic. În cadrul capitolului, analiza este realizată prin ecuații de stare, ecuații nodale modificate și simulări cu programe precum MATLAB, ACAP și SPICE [95]–[112].

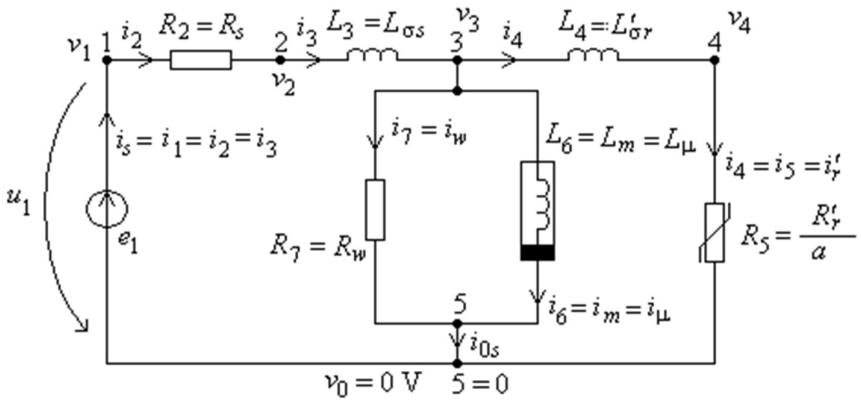


Fig. 9.1. Schema echivalentă în *Π* a motorului de inducție

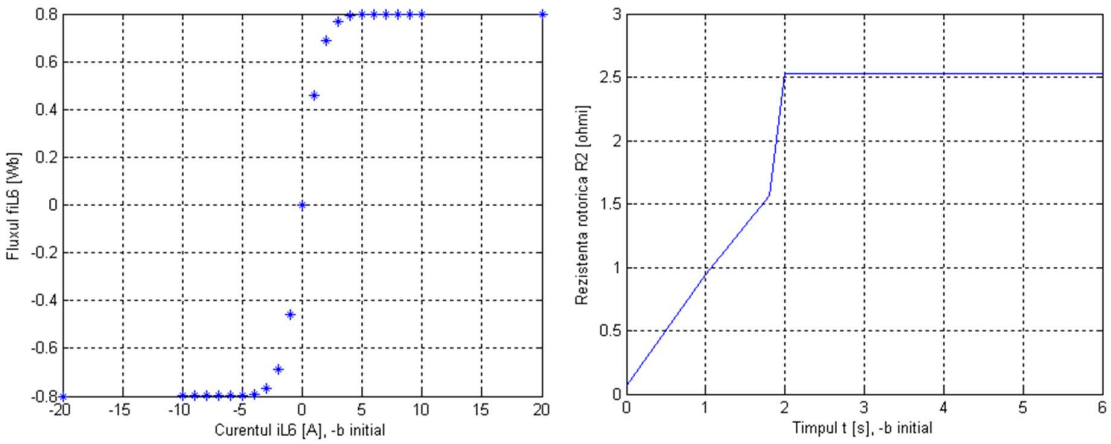
Figura 9.1 reprezintă modelul electric pe baza căruia se realizează analiza. Schema arată motorul ca un circuit echivalent format din rezistențe, inductanțe, ramura de magnetizare și rezistența rotorului raportată la stator. Această figură este esențială pentru înțelegerea modelării motorului ca circuit electric.

Modelul analizat ia în considerare două aspecte importante: caracteristica neliniară de magnetizare și variația rezistenței rotorice raportate în funcție de alunecare. Bobina de magnetizare este tratată ca o bobină neliniară controlată în curent, iar rezistența rotorului este considerată variabilă, în funcție de regimul de funcționare. Aceste elemente fac ca modelul să fie mai realist decât un model liniar simplificat.

Ecuațiile de stare ale motorului sunt prezentate în relația **(9.1)**. Această relație descrie evoluția curenților și tensiunilor în circuitul echivalent al motorului, luând în considerare caracterul neliniar al ramurii de magnetizare. În cadrul acestei relații apare inductivitatea diferențială a bobinei de magnetizare, care depinde de curent. Această dependență este importantă deoarece, atunci când miezul magnetic intră în saturație, inductivitatea nu mai rămâne constantă.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_3 \\ i_4 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_2+R_7}{L_3} & \frac{R_7}{L_2} & \frac{R_7}{L_2} \\ \frac{R_7}{L_4} & -\frac{R_7+R_{p5}}{L_4} & -\frac{R_7}{L_4} \\ \frac{R_7}{L_{di6}(i_6)} & -\frac{R_7}{L_{di6}(i_6)} & -\frac{R_7}{L_{di6}(i_6)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_3 \\ i_4 \\ i_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [e_1], \tag{9.1}$$

Pentru rezolvarea numerică a modelului, capitolul utilizează ecuațiile nodale modificate și algoritmul Euler implicit. Acestea sunt prezentate prin relațiile (9.2) și (9.3). Caracteristica neliniară de magnetizare este aproximată prin segmente de dreaptă, conform relației (9.4). Această aproximare permite introducerea saturației magnetice în analiza numerică și face posibilă integrarea ecuațiilor în MATLAB sau compararea cu rezultatele obținute prin ACAP și SPICE.



(a) (b)

Fig. 9.2. a) Caracteristica $\varphi_{Lm}(i_{Lm}) = \varphi_{L6}(i_{L6})$ş b) Caracteristica $R_2(t)$.

În Fig. 9.2 a este prezentată caracteristica de magnetizare flux–curent, care arată neliniaritatea miezului magnetic. În Fig. 9.2 b este prezentată variația rezistenței rotorice în timp sau în funcție de alunecare. Aceste două grafice explică vizual de ce motorul nu poate fi tratat întotdeauna ca un consumator liniar.

Pentru simularea în SPICE a bobinei neliniare controlate în curent, capitolul prezintă o schemă echivalentă dedicată. Această schemă permite reprezentarea comportării neliniare a bobinei de magnetizare prin surse comandate și elemente auxiliare, astfel încât fenomenul de saturație să poată fi analizat numeric.

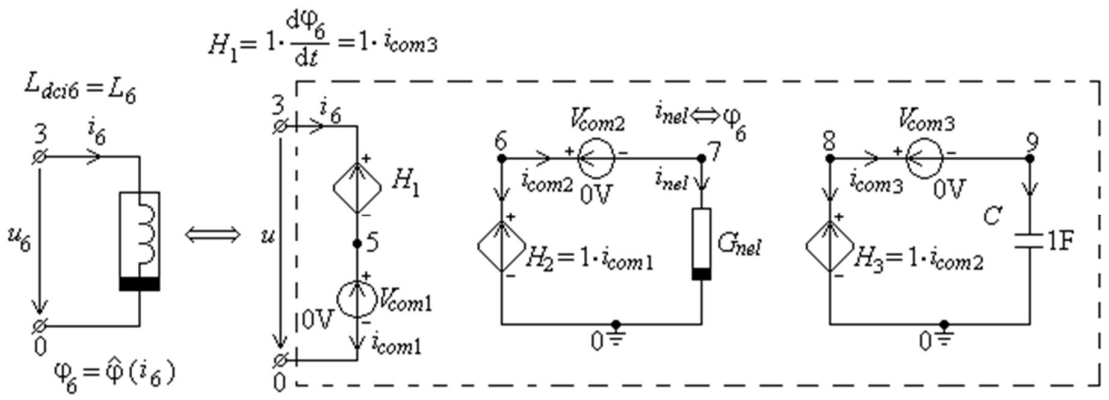
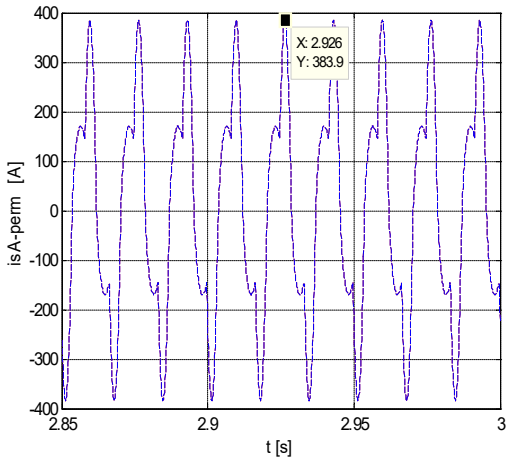


Fig. 9.3. Simularea în Spice a bobinelor neliniare controlate în curent.

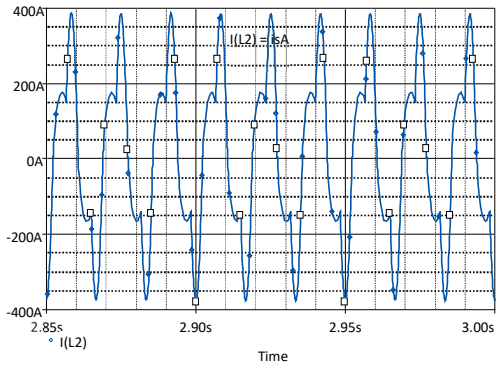
Rezultatele simulărilor sunt prezentate în Tabelul 9.1, care compară rezultatele obținute prin programele ACAP și SPICE. Sunt analizate formele de undă în timp și spectrele de frecvență pentru curenții statorici, curenții rotorici, curentul de magnetizare, tensiunile pe inductanțe, pierderile în cupru, pierderile în fier, puterea mecanică și cuplul electromagnetic.

Tabelul 9.1 Acestea arată cel mai clar influența saturației asupra motorului și legătura cu riscul de suprasarcină și încălzire.

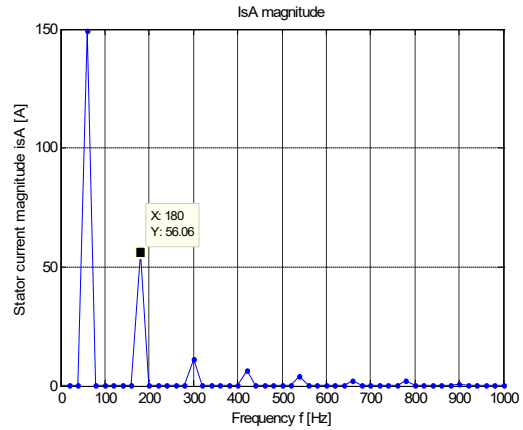
Tabelul 9.1. Rezultatele obţinute



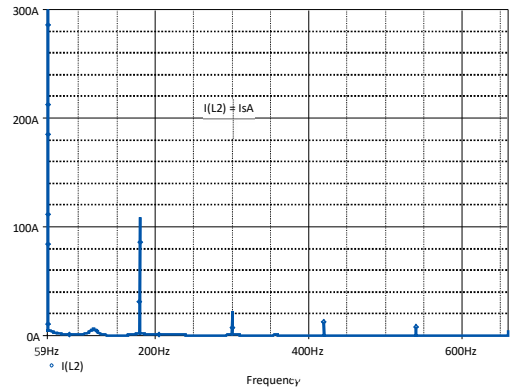
$i_{sA} - t$ – programul ACAP.



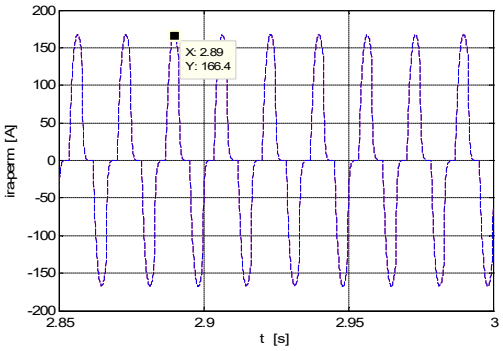
$i_{sA} - t$ – programul SPICE.



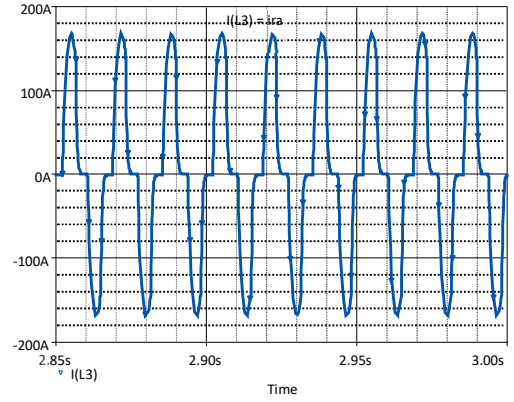
$I_{sA} - f$ –programul ACAP.



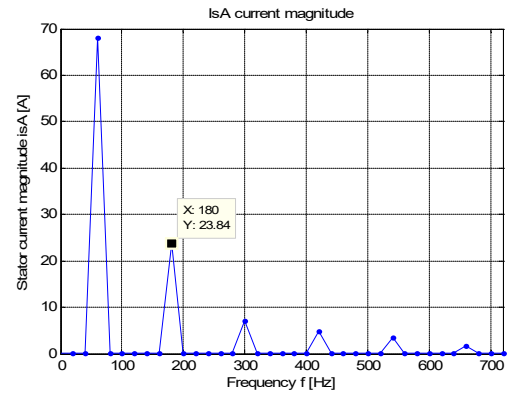
$I_{sA} - f$ –programul SPICE.



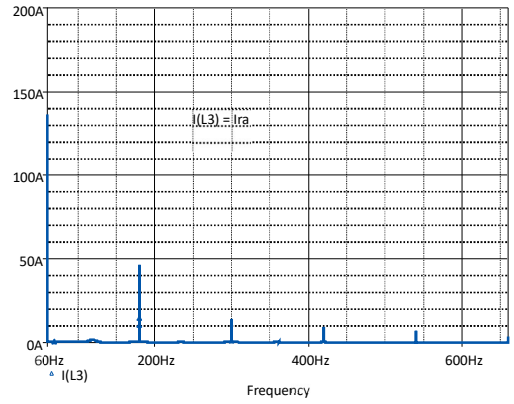
$i_{ra} - t$ – programul ACAP.



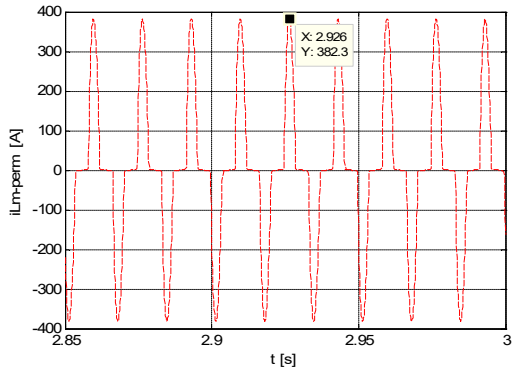
$i_{ra} - t$ – programul SPICE.



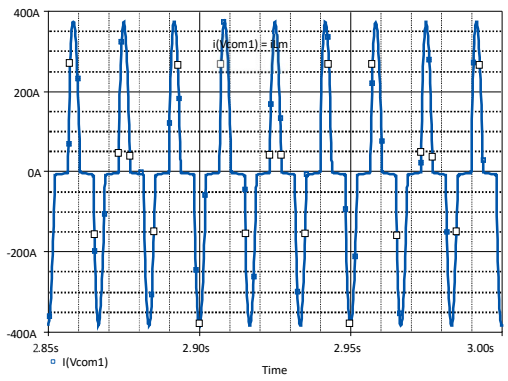
$I_{ra} - f$ – programul ACAP.



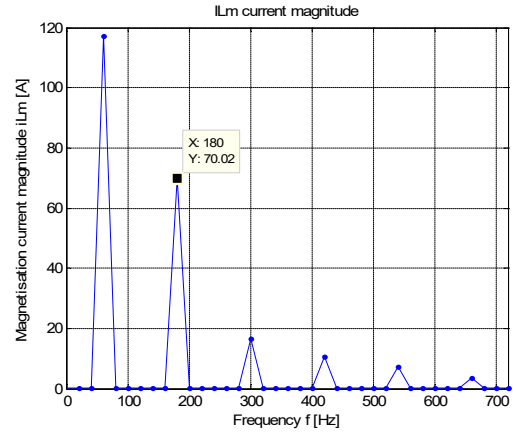
$I_{ra} - f$ – programul SPICE.



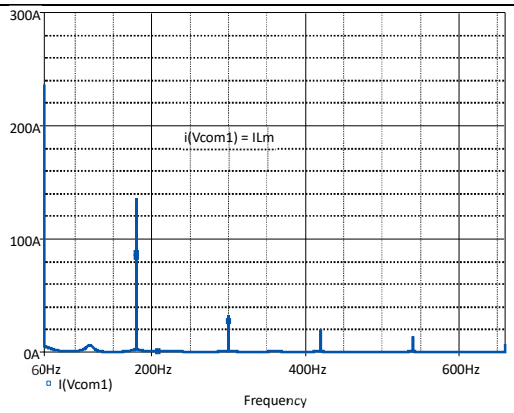
$i_{Lm} - t$ – programul ACAP.



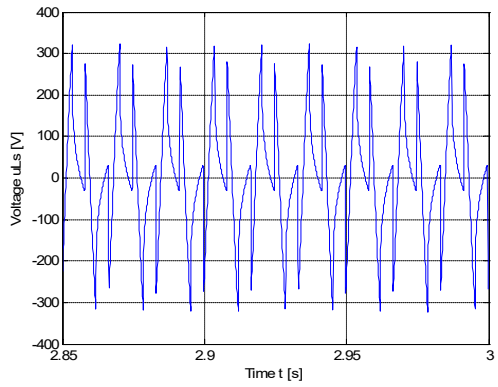
$i_{Lm} - t$ – programul SPICE.



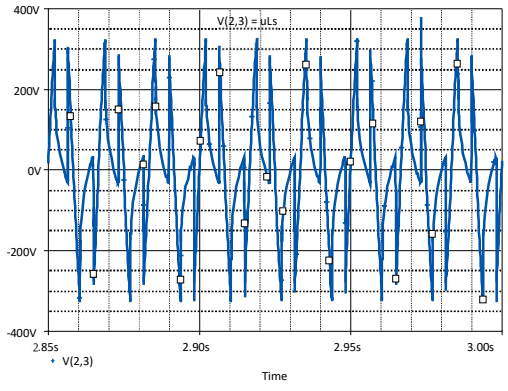
$I_{Lm} - f$ – programul ACAP.



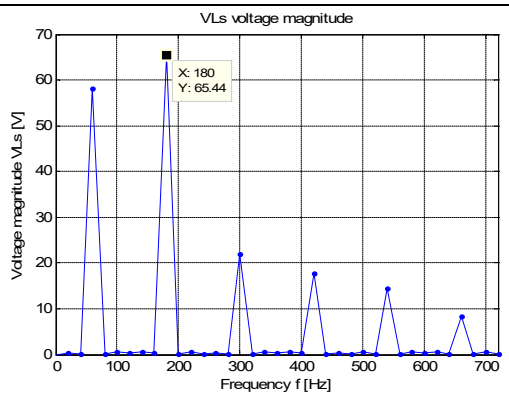
$I_{Lm} - f$ – programul SPICE.



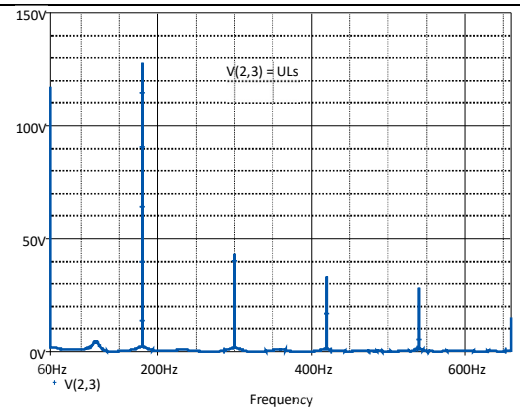
$u_{Ls} - t$ – programul ACAP.



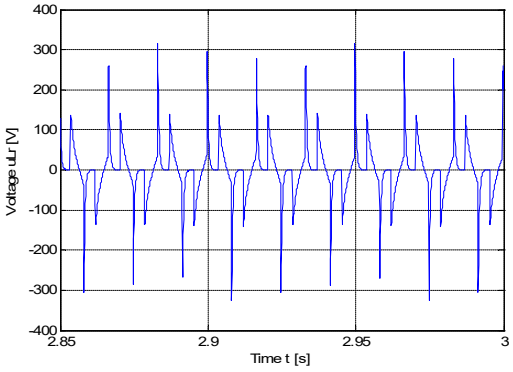
$u_{Ls} - t$ – programul SPICE.



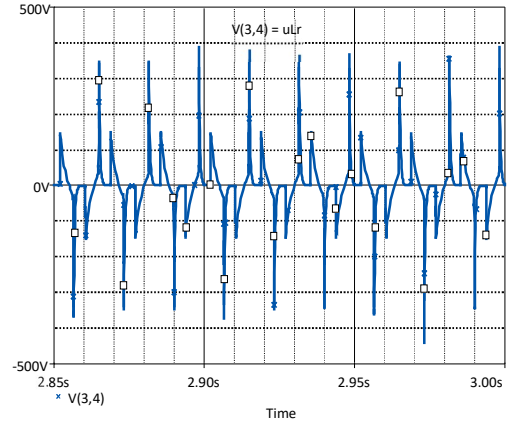
$U_{Ls} - f$ – programul ACAP.



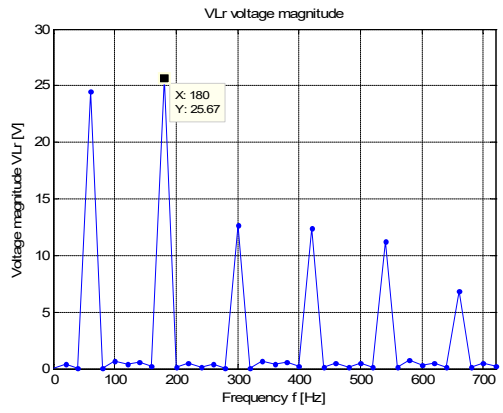
$U_{Ls} - f$ – programul SPICE.



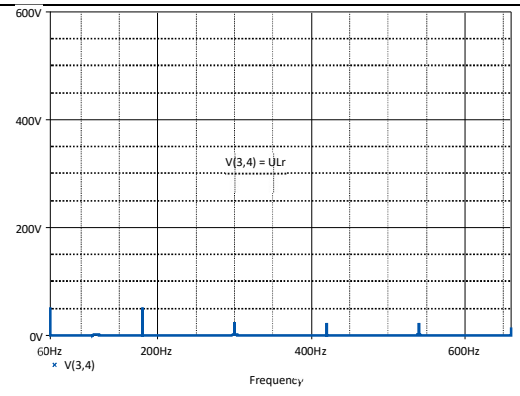
$u_{Lr} - t$ – programul ACAP.



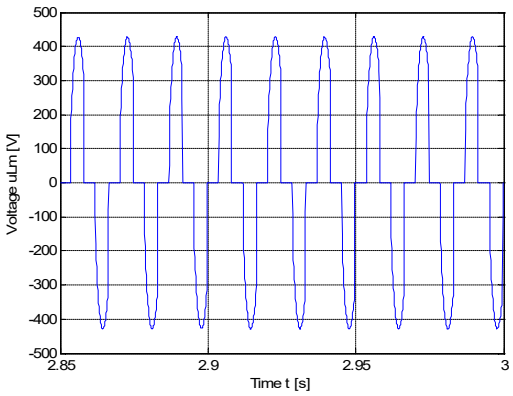
$u_{Lr} - t$ – programul SPICE.



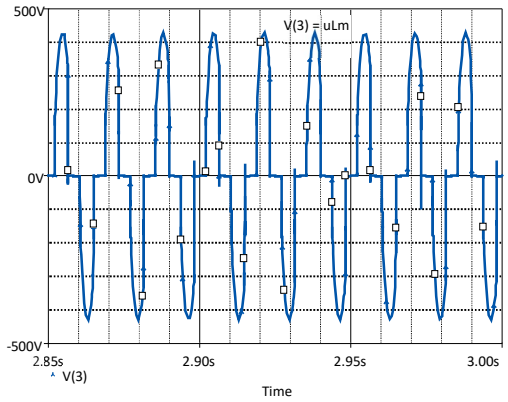
$U_{Lr} - f$ – programul ACAP.



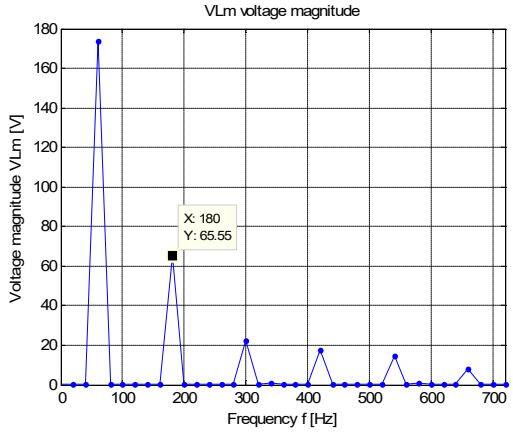
$U_{Lr} - f$ – programul SPICE.



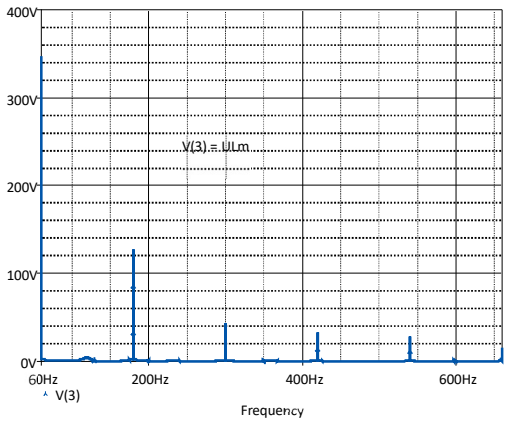
u_{Lm}– t – programul ACAP.



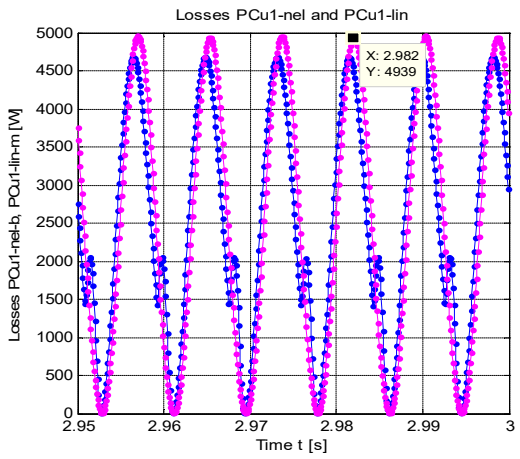
u_{Lm}– t – programul SPICE.



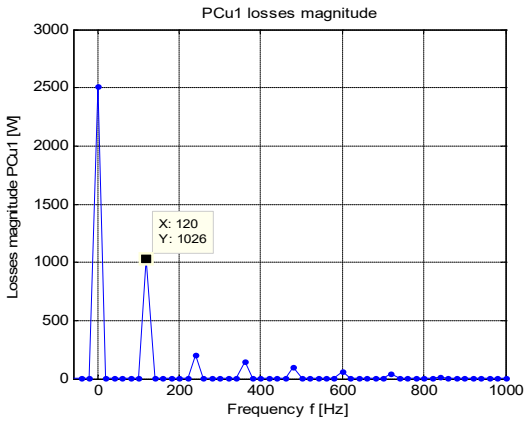
U_{Lm}– f – programul ACAP.



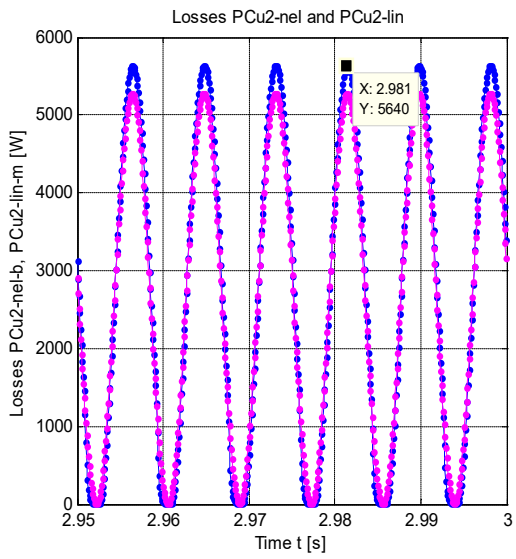
U_{Lm}– f – programul ACAP.



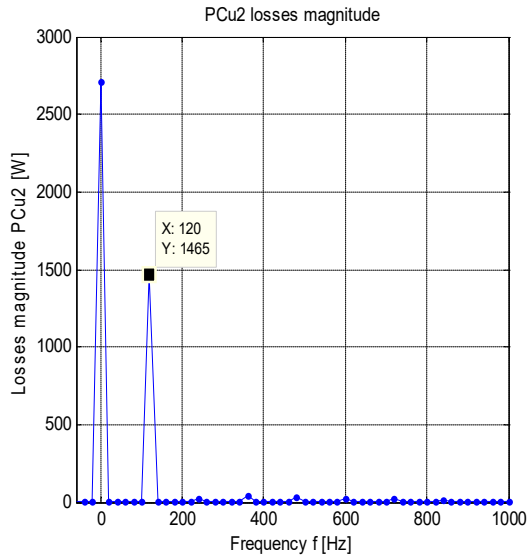
P_{Cu1} – t – programul ACAP.



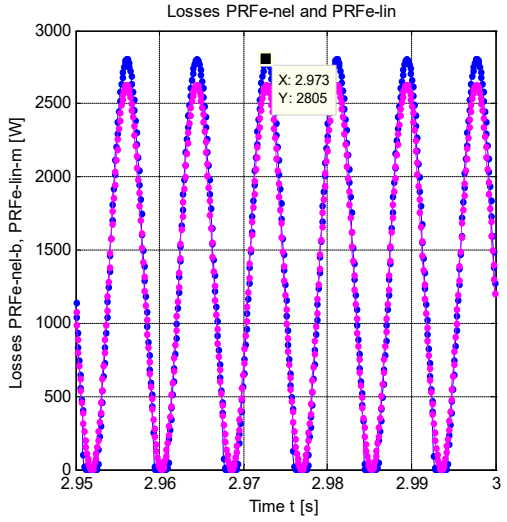
P_{Cu1} – f – programul ACAP.



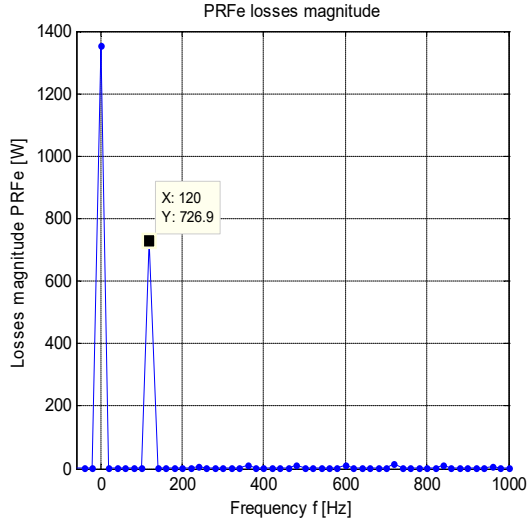
$P_{Cu2} - t$ – programul ACAP.



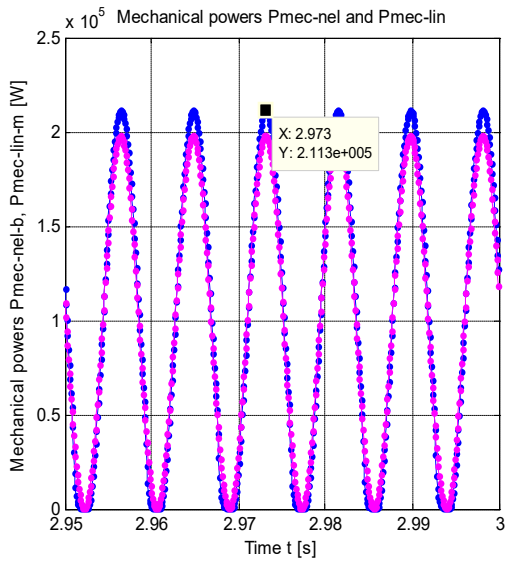
$P_{Cu2} - f$ – programul ACAP.



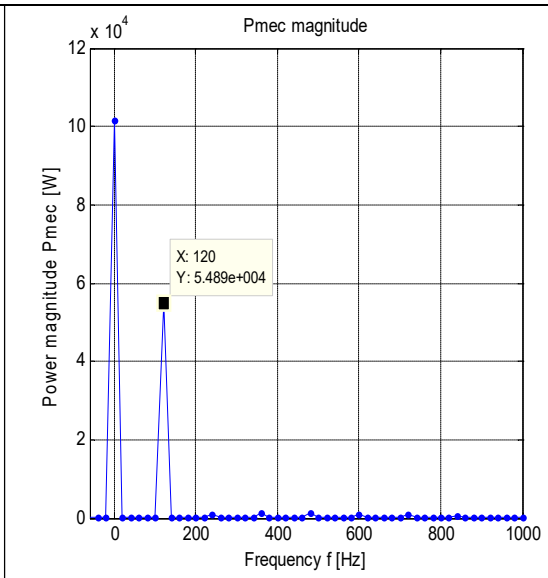
$P_{RFe} - t$ – programul ACAP.



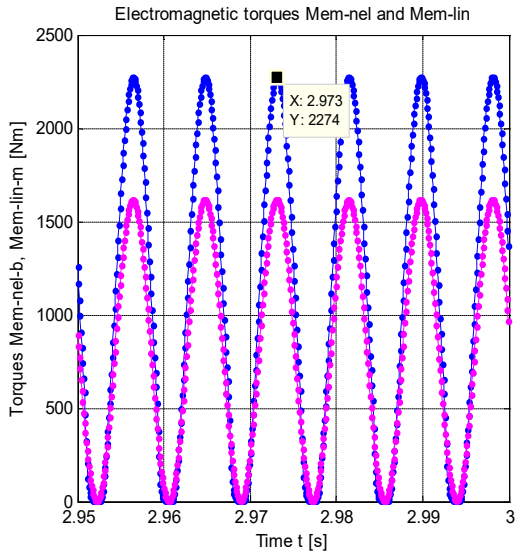
$P_{RFe} - f$ – programul ACAP.



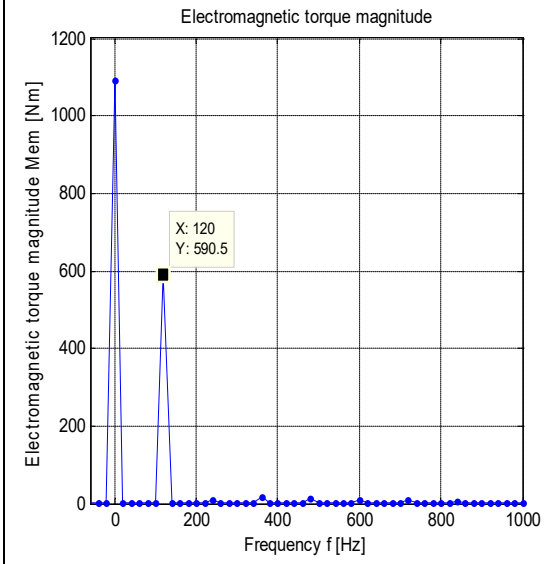
$P_{mec} - t$ – programul ACAP.



$P_{mec} - tf$– programul ACAP.



$M_{em} - t$ - Programul ACAP.



$M_{em} - f$ - Programul ACAP

Din rezultatele obținute se observă că, atunci când se ia în considerare saturația magnetică, formele de undă ale curenților și tensiunilor nu mai sunt perfect sinusoidale. În spectrele de frecvență apar armonici de ordin superior, care produc pierderi suplimentare și afectează randamentul motorului. Aceste armonici pot contribui la încălzirea suplimentară a conductoarelor, a înfășurărilor și a echipamentelor de alimentare, ceea ce este important pentru analiza riscului în instalațiile de joasă tensiune.

Analiza rezultatelor confirmă că saturația magnetică determină apariția unui conținut ridicat de armonici atât în curenți, cât și în tensiuni. Prezența acestor armonici conduce la creșterea pierderilor în cupru și în miez, la scăderea eficienței și la reducerea factorului de putere. Din punct de vedere practic, aceste efecte pot conduce la o solicitare mai mare a instalației electrice

de alimentare, la încălzirea conductorilor și a echipamentelor și la necesitatea dimensionării corecte a protecțiilor.

Capitolul evidențiază și faptul că simulările realizate cu ACAP, CSAP, MATLAB și SPICE permit compararea comportării motorului în regim liniar și neliniar. Originalitatea abordării constă în posibilitatea tratării unor parametri ai circuitului echivalent ca simboluri sau ca mărimi variabile, ceea ce permite analiza motorului în diferite regimuri de funcționare. Această flexibilitate este importantă pentru evaluarea performanțelor motorului și pentru identificarea regimurilor care pot produce solicitări suplimentare în instalația electrică.

În concluzie, Capitolul 9 arată că motorul de inducție trebuie analizat nu doar ca un consumator electric simplu, ci ca un sistem cu parametri variabili și comportament neliniar. Caracteristica de magnetizare, saturația miezului, variația rezistenței rotorice și alunecarea influențează curenții absorbiți, armonicile, pierderile, randamentul, factorul de putere și solicitările termice. În raport cu tema tezei, acest capitol contribuie la înțelegerea modului în care consumatorii importanți pot produce suprasarcini, dezechilibre, pierderi suplimentare și încălziri locale. Astfel, modelarea motorului de inducție devine un instrument util pentru dimensionarea protecțiilor, prevenirea defectelor și reducerea riscului în instalațiile electrice de joasă tensiune.

Capitolul 10

Concluzii generale și direcții viitoare de cercetare

Siguranța instalațiilor electrice de joasă tensiune nu poate fi asigurată doar prin existența normativelor, a verificărilor periodice sau a unor buletine de măsurători. Concluzia principală a tezei este că **verificarea unei instalații electrice trebuie realizată întotdeauna în baza proiectului tehnic, a schemelor reale și a documentației actualizate**. În lipsa proiectului, verificarea nu poate fi completă și corectă, deoarece nu se poate stabili cu certitudine dacă instalația existentă corespunde soluției proiectate, dacă protecțiile sunt corect dimensionate, dacă circuitele sunt identificate corect și dacă modificările realizate în timp sunt conforme.

O instalație electrică fără proiect actualizat devine greu de controlat, greu de verificat și riscant de exploatat. Mentenanța nu poate fi făcută corect atunci când nu se cunoaște schema monofilară reală, traseul circuitelor, secțiunea conductoarelor, protecțiile aferente și consumatorii alimentați. În aceste condiții, verificarea devine parțială, iar siguranța instalației este doar aparentă.

Cercetarea evidențiază și faptul că dezvoltarea tehnologică, automatizarea, digitalizarea, sistemele inteligente și noii consumatori au evoluat foarte rapid, în timp ce, în multe situații, cunoștințele de bază privind instalațiile electrice nu au fost suficient consolidate sau aplicate corect. S-a trecut rapid la tehnologii moderne fără ca infrastructura electrică de bază să fie întotdeauna verificată, modernizată și întreținută corespunzător.

Prin apariția noilor tehnologii, funcționarea optimă și mentenanța instalațiilor electrice au fost uneori minimalizate sau neglijate. Totuși, orice tehnologie modernă, indiferent cât de avansată

este, se bazează pe o instalație electrică sigură, corect proiectată și corect exploatată. Dacă această bază nu este sigură, atunci și sistemele moderne alimentate de ea devin vulnerabile.

Teza arată că instalația electrică reprezintă fundamentul pe care se dezvoltă noile tehnologii. De aceea, aceasta trebuie tratată ca o infrastructură esențială, care necesită proiectare corectă, execuție conformă, verificare pe baza documentației reale, mentenanță periodică și monitorizare continuă a parametrilor critici.

În concluzie, reducerea riscului de accidente în instalațiile electrice de joasă tensiune presupune respectarea unui principiu fundamental:

Nu se poate verifica, întreține sau moderniza corect o instalație electrică fără proiect tehnic, scheme actualizate și documentație completă.

Siguranța instalațiilor electrice trebuie să fie rezultatul unui proces continuu de proiectare, execuție, verificare, mentenanță și monitorizare, nu doar rezultatul unor verificări punctuale sau al interpretării individuale a normativelor.

10.1. Lista lucrărilor publicate

Această listă cuprinde lucrările publicate în timpul stagiului doctoral, cu subiecte din tematica tezei de doctorat, la care doctorandul este autor sau co-autor:

1. Dragoș Niculae, Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Lavinia Bobaru, **Adrian Georgescu,** Victor Bucată, "Computer Aided Design of Two-Element Matching Network Using ZY Smith Chart", Proc. of the 16th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2024, Publisher: IEEE Xplore, Date of Conference: October 24-26, 979-8-3503-8810-7/24/2024, Date Added to IEEE *Xplore*: 28 June 2021,DOI**:** 10.1109/ICATE62934.2024.10748638,pag. 1 – 6. https://ieeexplore.ieee.org/document/10748637/

2. **Adrian Georgescu**, Mihai Iordache, Constantin Dragoș, "When Does It Become Necessary to Replace the Electrical Instalation in an Old Building to Reduce Risk of Accidents?", Proceedin of 10th International Conference on Materials Sciene and Technologies _ ROMAT 2024, Bucharest, Romania, November 14th – 15th, 2024, www.sim.upb.ro, https://materialfest.upb.ro/editia-2024/

3.**Adrian-Florian Georgescu,** Dragos, Niculae, Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Ana-Maria Bumbeneci, Lavinia Bobaru, Georgiana Zainea and Mihai Rotaru, "Automatic Procedure and the Use of the Smith Chart in Impedance Matching in Analog Circuits", Electronics 2025, 14, 2746 https://doi.org/10.3390/electronics14142746, Published: 8 July 2025, **WOS:001539842500001,** pp. 1 – 17.

https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001539842500001

4. Mihai Iordache, Marilena Stanculescu, Lavinia Bobaru, Dragoș Niculae, Sorin Deleanu, **Adrian Georgescu**, Mihai Rotaru, Anton Anastasie Moscu, "Using the SSEMGP – SEMI - STATE Equation Matrix Generation Program for Transfer Function Generation in Analog Circuits with Single Input – Single Output and Multiple Inputs - Multiple Outputs", Published in: 2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Date of Conference**:**16-18 October 2025, Date Added to IEEE *Xplore*: 03 December 2025, ISBN Information: DOI: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260820, Accession Number: **WOS: 001669739200039**, Publisher: IEEE, pp. 1 -30.https://0d10tkmr4-

y-https-www-webofscience-com.z.e-nformation.ro/wos/woscc/full-record/WOS:001669739200039

5. **Adrian Georgescu**, Mihai Iordache, Dragoș Niculae, Lavinia Bobaru, Georgiana Rezmeriță, Mihai Rotaru, Ana-Maria Tudor. "Generation of Two–Port Circuit and Filter Parameters". Proceeding of the 14th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE'25. Anul publicării: 2025, Paginile: 373-377, Editura: Politehnica Press / IEEE, ISBN: 979-8-3315-2646-7. DOI: https://doi.org/10.1109/ATEE66006.2025.11299872 IEEE Xplore.

6. Mihai Rotaru, **Adrian Georgescu**, Dragoș Niculae, Georgiana Zainea, Mihai Iordache and Steliana Pușcașu, "Conversions Among Z, Y, H, F, T, and S Parameters, Which are Highly Beneficial for the Analysis of Two-Port Circuits and Filters*"*, Energies 2026, 15(2), 1344, https://doi.org/10.3390/electronics 15020255, Accession Number: **WOS:001670332900001**, pp. 1 – 23.
https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001670332900001

7. Mihai Rotaru, **Adrian-Florian Georgescu**, Mihai Iordache**,** Dragoș Niculae, Steliana Pușcașu, Georgiana Zainea, "Analysis of the Asyncronous Motor in Steady-State Regime When Taking into Consideration the Magnetization Characteristic and the Variation of the Rotor Resistance with Slip", Electric Machines, Materials, and Drives Present and Trends. APME/SME'25, Ediţia XXI, 28 noiembrie 2025, UNSTP Bucharest. Vol. 21 No. 1 (2025): APME DOI:
https://doi.org/10.36801/yqxg8c71,https://journal.iem.pub.ro/apme/en/article/view/1763.

8. Prof. emerit dr. arh. Cristina Olga GOCIMAN, Facultatea de Arhitectura UAUIM; Prof. univ. dr. ing. **Mihai IORDACHE**, Universitatea Politehnica din Bucureşti; Drd. ing. **Adrian Florian GEORGESCU** Universitatea Politehnica din Bucureşti; Dr. arh. Stefania TRIFAN, UAUIM; Dr. arh. urb. Cristian Iosif MOSCU, UAUIM. „Studii de caz cu privire la reducerea riscurilor la clădirile unităților spitalicești". CONFERINTA INNOMINCU 2022: Zilele cercetarii in UAUIM Sanatatea oraselor. Arhitectura sanatoasa. Designul interior al spatiilor sanatoase.
https://www.uauim.ro/evenimente/conferinta-innomincu-2022/

10.2. Impactul științific și aplicativ

Cercetarea prezentată în această lucrare are un **impact dublu** – teoretic și aplicativ.

- **Științific:** extinde metodele de **analiză numerică a circuitelor** spre domeniul **instalațiilor electrice**, oferind un cadru **interdisciplinar** (electronică – energie – siguranță).
- **Aplicativ:** rezultatele pot fi implementate în programe de **modernizare**, **mentenanță predictivă** și **formare profesională** (electricieni/ingineri).

Aplicarea sistemului propus poate conduce la:

- **reducerea** numărului de **incendii** cauzate de instalații defecte;
- **creșterea fiabilității** rețelelor de joasă tensiune;
- **îmbunătățirea managementului energetic**;

- crearea unei **baze de date naționale** a instalațiilor monitorizate.

Bibliografie

[1] *Chen, X.,* et al. (2021). BN-RA: A Hybrid Model for Risk Analysis of Overload-Induced Early Cable Fires. Applied Sciences, 11(18), 8922.

[2] *U.S. Fire Administration* (2014). Residential Building Electrical Fires (2009–2011).

[3] *SR HD 60364-7-710* - Instalaţii electrice de joasă tensiune. Partea 7-710: Prescripţii pentru instalaţii sau amplasamente speciale. Amplasamente pentru utilizări medicale;

[4] *NORMATIV privind* proiectarea, executia si exploatarea instalatiilor electrice aferente cladirilor - Indicativ I 7 – 2011

[5] *Prof. emerit dr. arh. Cristina Olga GOCIMAN,* Facultatea de Arhitectura UAUIM; *Prof. univ. dr. ing. Mihai IORDACHE,* Universitatea Politehnica din Bucureşti; *Drd. ing. Adrian Florian GEORGESCU* Universitatea Politehnica din Bucureşti; *Dr. arh. Stefania TRIFAN*, UAUIM; *Dr. arh. urb. Cristian Iosif MOSCU,* UAUIM, Studii de caz cu privire la reducerea riscurilor la clădirile unităților spitalicești;

[6] NORMATIV NTE 007_08_00 – Pentru proiectarea si executarea retelelor de cabluri electrice;

[7] *Ionuț-Cătălin Munteanu, Emil Cazacu, Lucian Petrescu*, Predictive-adaptive maintenance applied for optimizing the performance of industrial electrical systems and equipment;

[8] *STAS 12604/4-89* - PROTECŢIA ÎMPOTRIVA ELECTROCUTĂRILOR;

[9] *PE 016 – E/2001* Normativ pentru lucrarile de Expoatare-Mentenanta in Retele Electrice de distributie.

[10] *PE 116-94,* NORMATIV DE ÎNCERCĂRI ŞI MĂSURĂTORI LA ECHIPAMENTE ŞI INSTALAłII ELECTRICE;

[11] *NORMATIV C 56-02*, PENTRU VERIFICAREA CALITATII SI RECEPTIA LUCRARILOR DE INSTALATII AFERENTE CONSTRUCTIILOR;

[12] *NFPA 780* – Standard for the installation of Lightning Protection Systems 2020

[13] *RC62*-Recommendations-for-fire-safety-with-PV-panel-installations

[14] *IEC 62446-2-2020* – Photovoltaic system – requirements for testing, documentation and mentenance.

[15] Requirements of persons doing electrical wiring – Canada Rules; Residential_wiring_guide (1) _240414_101620 – Canada, Homeowner electrical wiring guide Including the 2015 Canadian Electrical Code amendments

[16] *NTE 006/06/00* - Normativ privind metodologia de calcul al curenților de scurtcircuit în reţelele electrice cu tensiunea sub 1 kV, aprobat prin Ordin ANRE nr. 7/2006

[17] *IRE-Ip30-2004* - Îndreptar de proiectare și execuție a instalațiilor de legare la pământ, avizat în CTS SC Electrica SA cu PV 299/2004

[18] *M. Iordache, N. Ludu,* "Calculul regimurilor tranzitorii din convertizorul static de frecvenţă de 500 Hz, asistat de calculatorul numeric", E.E.A. - Electrotehnica 5

[19] *Dragoş Marin Niculae, Marilena Stanculescu, Sorin Deleanu, Mihai Iordache and Lavinia Bobaru*,"Wireless Power Transfer Systems Optimization Using Multiple Magnetic Couplings", Electronics 2021, 10 (20), https://doi.org/10.3390/electronics10202463, 2463, www.mdpi.com/journal/electronics- 2463, 11 Oct 2021, 16 pags. Impac Factor: 2.397, CITESCORE: 2.7 SCOPUS, ELECTRONICS Volume: 10 Issue: 20 Article Number: 2463 DOI: 10.3390/electronics10202463 Published: OCT 2021 Accession Number: WOS:000715322800001.

[20] *Ioana-Gabriela Sirbu, Lucian Mandache, Marilena Stanculescu, Mihai Iordache, and Lavinia Bobaru,* "Generation Algorithms for Thévenin and Norton Equivalent Circuits", Energies 2025, 18, 1344. https://doi.org/10.3390/en18061344, Accession Number: WOS:000715322800001.

[21] *Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Dragos Niculae, Bogdan Venescu, Mihaela Cristina Turcu, Neculai Galan*, "The Overvoltage Distribution across TransformeWindings in presence of Long Feeders", Publisher: IEEE, IEEE Xplore, 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 4-6 Oct. 2018, DOI: 10.1109/ICATE.2018.8551469, 978-1-5386-3806-4/18/$31.00 ©2018 IEEE, Accession Number: WOS:000487278600080, Page(s): 1 - 6.

[22] *Dragoş Niculae, Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Lavinia Bobaru, Adrian Georgescu, Victor Bucată*, "Computer Aided Design of Two-Element Matching Network Using ZY Smith Chart", Proc. of the 16th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2024, Publisher: IEEE

Xplore, Date of Conference: October 24-26, 979-8-3503-8810-7/24/2024, Date Added to IEEE Xplore: 28 June 2021, DOI: 10.1109/ICATE62934.2024.10748638, pag. 1 – 6.
[23] *Adrian Georgescu, Mihai Iordache, Constantin Dragoș*, "When Does It Become Necessary to Replace the Electrical Instalation in an Old Building to Reduce Risk of Accidents?", Proceedin of 10th International Conference on Materials Sciene and Technologies _ ROMAT 2024, Bucharest, Romania, November 14th – 15th, 2024, www.sim.upb.ro, pp. 12 – 20;
[24] NP 015/2022 – Normativ pentru proiectarea și executarea instalațiilor electrice aferente clădirilor spitalicesti;
[25] NP061/2002 - Normativ privind protecția împotriva electrocutărilor;
[26] P118/2015 - Normativ de siguranță la incendiu a construcțiilor;
[27] Legea 319/2006 - Legea securității și sănătății în muncă;
[28] Legea 123/2012 - Legea energiei electrice și a gazelor naturale;
[29] Ordin ANRE 59/2013 - Regulament privind autorizarea electricienilor și firmelor de execuție;
[30] Ordinul Ministrului Sănătății nr. 914/2006;
[31] Legea 10/1995 privind calitatea în construcții.
[32] Hotărârea Guvernului nr. 2139/2004 pentru aprobarea Catalogului privind clasificarea și duratele normale de funcționare a mijloacelor fixe, publicată în Monitorul Oficial nr. 46 din 13 ianuarie 2005.
[33] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley 2012.
[34] S. Liao, Microwave devices and circuits, Prentice Hall 1996.
[35] G. Lojewski, Dispozitive si circuite de microunde, Ed. Tehnica 2005.
[36] N. Voicu, Sisteme de microunde. Elemente de teorie, constructie, Matrixrom 2004,
[37] G. Lojewski, Microunde, .dispozitive si circuite, Teora 1999.
[38] G. Lojewski, N. Militaru, Circuite de microunde. Culegere probleme, Matrixrom 2014.
[39] Gheorghe GAVRILOAIA Circuite pasive de microunde, Editura Academiei Tehnice Milit 2010.
[40] Daniel Alexandru Vişan, Ioan Liţă, Mariana Jurian, Ion Bogdan Cioc, "Dispozitive semiconductoare pentru microunde", Ed. Matrix Rom, Bucuresti, 2015.
[41] Microwaves 101: https://www.microwaves101.com/
[42] AT3000 Kit – manual de utilizare.
[43] Electromagnetic Harvesters: Free Lunch or Theft: http://www.industrytap.com/electromagnetic-harvesters-free-lunch-or-theft/1805.
[44] Real-Life Physics, vol.3:
[45] http://www.scienceclarified.com/everyday/Real-Life-Physics-Vol-3-Biology-Vol-1/
[46] Microwaves – Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave.
[47] Tiberiu Mociran, Aplicatiile microundelor, http://cursuri.flexform.ro.
[48] Magnetic monopole – Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_monopole.
[49] Triple vector product – Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Triple_product#Vector_triple_product.
[50] Polarization – Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_(waves).
[51] Polarization of light: https://www.youtube.com/watch?v=8YkfEft4p-w
[52] The polarization of the sky: https://www.polarization.com/sky/sky.html.
[53] Wave and Anthenna Polarization: http://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php.
[54] G. A. Iordăchescu, "Microunde: teorie și aplicații", Editura Universității din Pitești, ISB 978-606-560-595-4, 2018.
[55] Adrian-Florian Georgescu, Dragos, Niculae , Mihai Iordache , Marilena Stănculescu , Ana-Maria Bumbeneci, Lavinia Bobaru , Georgiana Zainea and Mihai Rotaru, "Automatic Procedure and the Use of the Smith Chart in Impedance Matching in Analog Circuits", Electronics 2025, 14, 2746 https://doi.org/10.3390/electronics14142746, Published: 8 July 2025, WOS:001453861100001, pp. 1 – 17.
[56] https://www.microwaves101.com/calculators/872-vswr-calculatorhttp://rfcalculator.mobi/vswr-forward-reverse-power.html
[57] https://www.everythingrf.com/rf-calculators/vswr-calculator
[58] https://www.pasternack.com/t-calculator-vswr.aspx
[59] https://www.antenna-theory.com/definitions/vswr-calculator.php
[60] http://www.flexautomotive.net/flexcalc/VSWR2/VSWR.aspx
[61] https://www.allaboutcircuits.com/tools/vswr-return-loss-calculator/
[62] http://www.csgnetwork.com/vswrlosscalc.html
[63] https://www.ahsystems.com/EMC-formulas-equations/VSWR.php
[64] http://cgi.www.telestrian.co.uk/cgi-bin/www.telestrian.co.uk/vswr.pl[34]
[65] https://www.changpuak.ch/electronics/calc_14.php
[66] https://chemandy.com/calculators/return-loss-and-mismatch-calculator.htm
[67] https://www.atmmicrowave.com/calculator/vswr-calculator/
[68] http://www.emtalk.com/vswr.php

[69] L.O. Chua, C.A. Desoer, E.S. Kuh, "Linear and nonlinear circuits", McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
[70] A.F. Schwarz, "Computer-aided design of microelectronic circuits and systems. Fundamentals, Methods and Tools", Academic Press, New York, 1987.
[71] C.I. Mocanu, "Teoria circuitelor electrice", Editură Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1979.
[72] M. Preda, P. Cristea, "Bazele electrotehnicii", vol. I şi vol. II. Circuite electrice, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1980.
[73] C .I. Mocanu, "Teoria campului electromagnetic", Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1981.W. J. McCalla, "Fundamentals of Computer-Aided Circuit Simulation", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordecht/Lancaster, 1988.
[74] S. Franco, "Electric Circuits Fundamentals", Saunders College Publishing, New York, 1995.
[75] S.J. Orfanidis*, Electromagnetic Waves and Antennas*, 2008, http://www.ece.rutgers.edu/ orfanidi/ewa/.
[76] D. A. Frickey, "Conversions between S, Z, Y, H, ABCD, and T parameters which are valid for complex source and load impedances," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, No. 42, 1994, pp. 205–211.
[77] R. B. Marks and D. F. Williams, "Comments on conversions between S, Z, Y, H, ABCD, and T parameters which are valid for complex source and load impedances," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, No. 43, 1995, pp. 914–915.
[78] Mihai Iordache**,** Lucia Dumitriu, *Generation of the Transfer Functions for MIMO Systems*, Chapter 4; in book *Design of Analog Circuits through Symbolic Analysis,* Mourad Fakhfakh, Esteban Tlelo-Cuautle and Francisco V Fernandez (Eds), Bentham Science Publishers, 2012, pp. 83-114, pp. 228-262 respectively (e-book), **DOI:** 10.2174/97816080509561120101, **eISBN:** 9781-60805-095-6, **ISBN:** 978-1-60805-425-1, 2012, Accession Number: **WOS:000425767300006.**
[79] M. Iordache, *Symbolic, Numeric – Symbolic and Numeric Simulation of Analog Circuits – User Guides*, MATRIX ROM, Bucharest, 2015, ISBN 978 – 606 – 25 – 0126 - 6, 621.3.049.77
[80] M. Iordache, Lucia Dumitriu, *Computer-Aided Simulation of Analoque Circuits – Algorithms and Computational Techniques*, Editura POLITEHNICA Press, Vol. I and Vol. II, Bucharest 2014, ISBN 978–606-515-567-1, ISBN 978-606-515-585-5.
[81] http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?cc=US&lc=eng
[82] Agilent Technologies, AGILENT TECHNOLOGIES, Large-Signal S-Parameter Simulation, Sept, 2004.
[83] ANSOFT Q3D EXTRACTOR, User Guide, www.ANSOFT.com.
[84] https://www.feko.info/support.
[85] Marilena Stanculescu, Lavinia Bobaru, Dragoș Niculae, Sorin Deleanu, Victor Bucată, Mihai Iordache - Coordonator, "*Wireless Electromagnetic Energy Transfer Systems*", MATRIX ROM, Bucharest, 2021, ISBN 978 – 606 – 25 – 0623 - 0, 621.3.
[86] M. Iordache, H. S. Popescu, I. Vlad and M. F. Staniloiu, "ACAP - Analog Circuit Analysis Program," 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425307.
[87] M. Stanculescu, S. Deleanu, D. Sanatescu, A. Ionescu, A. Moscu and L. Bobaru, "CSAP and TFSG – Circuit Symbolic Analysis Programs and Transfer Function SYmbolic Generation" 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905907.
[88] M. Iordache, Lucia Dumitriu, D. Delion, "Automatic Formulation of Symbolic State Equations for Analog Circuits with Degeneracies", Proceedings of 6th International Workshop on Symbolic Methods and Applications in Circuit Design, SMACD 2000, October 12-13, 2000, pp. 65-72.
[89] M. M. Hassoun and Pen-Min Lin, "A hierarchical network approach to symbolic analysis of large-scale networks," in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 42, no. 4, pp. 201-211, April 1995, doi: 10.1109/81.382473.
[90] Comparisons between Maple, Mathematica and Macsyma, by alleyne@hera.ics.uci.edu (Brian D. Alleyne) Univ. of Calif., Irvine, Info. & Computer Sci. Dept. 16 Feb 93 07:25:10 GMT.
[91] G. Gielen, P. Wambacq, W. M. Sansen, "Symbolic Analysis Methods and Applications for Analog Circuits: A Tutorial Overview", Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No.2, Feb. 1994, pp. 287-303.
[92] P. M. Lin, Symbolic Network Analysis, Elsevier, 1991.
[93] A. Vladimirescu, SPICE, Editura tehnică, Bucureşti, 1999.
[94] Mihai Iordache - Coordonator, Marilena Stanculescu, Răzvan Asanache, Lavinia Bobaru, Sorin Deleanu, Dragoș Niculae, Georgiana Rezmeriță, "A*nalog Circuit Analysis Using S-Parameters and Smith Chart*", ISBN 978 – 606 – 25 – 0771 - 8, 621.3, Publishing House MATRIX ROM, Bucharest, 2022.
[95] L. O. Chua, and P. M. Lin, Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computational Techniques, Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975.
[96] A. E. Schwarz, Computer-aided design of microelectronic circuits and systems, Academic Press, London, 1987.

[97] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Computer-Aided Simulation of Analog Circuits – Algorithms and Computational Techniques, POLITEHNICA Press Publishing House , Bucharest,

[98] Mihai Iordache, Sorin Deleanu, Ciprian Curteanu, Neculai Galan, Anastasie Anton Moscu, „SYSEG - SYmbolic State Equation Generation", Proc. of the 11-th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELEM 2017, October 11-14, 2017, Chişinău Rep. MOLDOVA, Accession Number: WOS:000426906000036, Publisher: IEEE, pp. 1-7.

[99] Marilena Stănculescu, Alexandra Ionescu, Diana Sanatescu, Sorin DELEANU, Lavinia Bobaru, Anastasie Anton Moscu, "CSAP – Transfer Function SYmbolic Generation and TFSYG – Transfer Function SYmbolic Generation", Proc. of the 12th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELEM 2019, October 10-11, 2019, Chişinău Rep. MOLDOVA, IEEE Xplore, DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8123295 , Publisher: IEEE, pp. 1-7.

[100] Mihai Iordache, Horatiu Samir Popescu, Ionela Vlad, Marius Florin Staniloiu, "ACAP – Analog Circuit Analysis Program", Proceeding of the 12th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE'21, March 25-27, 2021, Bucharest, Romania, Editura Politehnica Press, pp. 373 - 377, IEEE Xplore, 978-1-6654-1878-2/20/$31.00 ©2017, DOI: 10.1109/ATEE.2021.9425098, Accession Number: **WOS:000676164800143**, Publisher:IEEE.

[101] C. Mihăilescu, Fl. Rezmeriță, Ileana Calomfirescu, M. Iordache, N. Galan, Performance Analysis of Three Phase-Squirred Cage Induction Motor with Deep Rotor Bars in Transient Behavior, Electrical and Electronic Engineering, p-ISSN:2162-9455 e-ISSN: 2162-8459, vol. 2, No. 2, 2012, pp. 11-17, WOS:000421805200018, DOI: 10.5923/j.eee.2012020202, pp. 235 - 248.

[102] Rodica Voiculescu, Iordache Mihai, „Analog Circuit Simulation by State Variable Method", U.P.B. Scientific Bulletin Series C – Electrical Engineering, Vol 71. Iss. 3. 2015, ISSN 2286-3540, WOS:000421805200018, pp. 213-224.

[103] Bogdan Florin VENESCU, Adrian Florinel BUCSA, Mihai IORDACHE, „ANALYSIS OF THE PERMANENT SINUSOIDAL REGIME OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR OF THE PRIMARY CIRCUIT PUMPS FROM A NUCLEAR POWER PLANT", U.P.B. Scientific Bulletin Series C – Electrical Engineering, Vol. 83, Iss. 2, 2021, ISSN 2286-3540, Accession Number: WOS:000692193500017, pp. 221 – 230.

[104] A.-K. Repo, P. Rasilo, a. A. Arkkio, Dynamic electromagnetic torque model and parameter estimation for a deep-bar induction machine, IET Electr. Power Appl., vol. 2, No. 3, pp. 183 -192, 2008.

[105] Levi E., Main flux saturation modelling in double-cage and deep-bar induction machines, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 11, No. 2, pp.305 – 311, 1996.

[106] K.S. Huang, Q.H. Wu, D.R. Turner, Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements. IEEE Trans. Energy Converssion, vol. 17, No. 1, pp.305 – 311, pp. 55 – 59, 2002.

[107] *J. Pedra, L Sainz*, Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements, IEE Proc. Electr. Power Appl., **vol. 153**, no.2, pp. 87 -94, 2006.

[108] *Rik W.A.A. De Doncker*, Field-Oriented Controllers with Rotor Deep Bar Compensation Circuits, IEEE Trans. Industry Applications, **vol. 28**, nr. 5 , pp. 1062 – 1070, 1992.

[109] *Jul-Ki Seok, Seung-Ki Sul*, Pseudorotor-Flux-Oriented Control of an Induction Machine for Deep-Bar-E ffect Compensation, IEEE Trans. Industry Applications, vol. 34, nr. 3 , pp. 429 – 434 , 1998.

[110] *Alexander C. Smith, Russell C. Healez, Stephen Williamson*, A Transient Induction Motor Model Including Saturation and Deep Bar Effect, IEEE Trans. Energy Converssion, **vol. 11**, No. 1, pp.8 -15, 1996.

[111] *L. Ljung,* "System identification: Theory for the user, 2nd edition", Prentice Hall, USA, 1999. [7]. *J. Pedra, F. Corcoles* "Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters from Manufacturer Data", IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2004.

[112] *T.Phumiphak, C. Chatuthai*, „Estimation of induction motor parameters based on a field test coupled with genetic algorithm", in Proc. Int. Conf. Power System Technology 2002, pp. 1199-1203.