

Vasile Mircea Popa

Sisteme nesimetrice
în electrotehnică

Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu
Sibiu, 2011

Unsymmetrical Systems in Electrotechnics

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

POPA, VASILE MIRCEA

Sisteme nesimetrice în electrotehnica / Popa Vasile Mircea. – Sibiu:
Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, 2011

Bibliogr.

ISBN 978-606-12-0253-9

621.3

Îngrijire editorială: autorul

Traducere prefață: arh. Silviu Ioan Popa

Tehnoredactare: arh. Silviu Ioan Popa

PREFATĂ

Funcționarea circuitelor electrice trifazate în regimuri nesimetrice a fost studiată încă de la începuturile utilizării energiei electrice în sistem trifazat. Au fost obținute rezultate fundamentale, ajunse astăzi clasice. Astfel, Stokvis a studiat regimurile nesimetrice și dezechilibrate începând cu anul 1915. Teorema Stokvis-Fortescue a fost publicată în anul 1918. Ulterior, prin contribuția adusă de diversi cercetători, teoria componentelor simetrice s-a dezvoltat și s-a perfecționat [P7].

Școala românească de electrotehnică are în acest domeniu contribuții notabile, începând cu savantul C. Budeanu încă din perioada interbelică. Un punct de vedere nou a fost evidențiat de profesorul A. Tugulea în unele lucrări publicate în ultimii ani [T10], [T11], [T12]. Pe o direcție apropiată se înscriu și lucrările cercetătorului E. Pavel [P5], [P6], [P7], [P8].

În lucrarea de față am abordat o serie de aspecte din domeniul sistemelor nesimetrice și al receptoarelor dezechilibrate, mai puțin tratate în literatura de specialitate. Am încercat să aduc unele sistematizări, completări și interpretări proprii acestui subiect și de asemenea, contribuții originale care sunt prezentate explicit în lucrare la fiecare capitol în parte.

Conținutul cărții este organizat pe trei capitole, anexă și bibliografie.

În capitolul 1 se face caracterizarea sistemelor trifazate nesimetrice cu ajutorul analizei armonice. Se analizează puntea de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni prin metoda analitică. Se consideră cazul general și mai multe cazuri particulare. În continuare se prezintă programul de calculator PDIODE, metoda simulării pe calculator și măsurările experimentale efectuate. Se analizează apoi și cazul punții de diode având o sarcină complexă. În încheierea capitolului 1 se propune un coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate.

În capitolul 2 se analizează comportarea unui motor asincron trifazat în regimuri nesimetrice de funcționare. În particular, se studiază funcționarea motoarelor asincrone trifazate cu o fază întreruptă, în cazul înfășurării statorice legate în stea, respectiv în triunghi. Se prezintă diverse metode și dispozitive pentru protecția antibifazică a motoarelor asincrone trifazate, realizate pe plan mondial. În încheierea capitolului 2 se propune un dispozitiv de protecție antibifazică funcționând pe baza unui principiu nou. Acest dispozitiv de protecție antibifazică a fost realizat și brevetat.

În capitolul 3 se reia și se aprofundează studiul punții de diode alimentate nesimetric. Capitolul 3 este de fapt o colecție de articole privind acest subiect, care au fost publicate anterior în diverse reviste și volume. Acest lucru constituie un avantaj pentru cititor, deoarece fiecare articol are un caracter independent și poate fi citit direct. Pe de altă parte, din acest motiv apar inevitabil unele repetări. Se prezintă studiul analitic al punții de diode alimentate nesimetric, utilizarea unui program de calculator în acest scop, studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni, aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric, și se introduce un coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate. În încheierea acestei părți se prezintă unele considerații asupra unui releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate.

Ca anexă a cărții este prezentat un tabel care indică unde au mai fost publicate articolele. La sfârșitul cărții este prezentată bibliografia.

Cartea poate interesa pe studenți, pe inginerii specializați în teoria circuitelor electrice, precum și pe toți cei pasionați de electrotehnica teoretică și aplicată în general, de teoria circuitelor electrice în special.

Conținutul lucrării poate fi fără îndoială îmbunătățit și completat. Voi fi recunosător pentru orice observație sau sugestie în acest sens, venită de la cititorii.

FOREWORD

The work of three-phased electrical circuits in non-symmetrical situations was studied since the early use of electrical energy in three-phased system. Fundamental results were obtained, considered classical today. Stokvis has studied the unbalanced and non-symmetrical situations as early as 1915. The Stokvis-Fortescue theorem was published in 1918. Subsequently, by the contribution of various researchers, the symmetrical components theory was developed and enhanced [P7].

The Romanian school of electrotechnics has notable contributions in this area, starting with scientist C. Budeanu since the interwar period. A new perspective was shown by professor A. Tugulea in some papers published in recent years [T10], [T11], [T12]. In a near direction are also situated the papers of researcher E. Pavel [P5], [P6], [P7], [P8].

In this paper I approach a number of issues in the field of non-symmetrical systems and of unbalanced loads, treated less in specialized literature. I tried to bring some systematization, addenda and personal interpretations to this subject and also original contributions which are explicitly presented in each chapter.

The contents of the book is organized into three chapters, an annex and bibliography.

The first chapter treats characterization of unsymmetrical three-phase systems with the aid of harmonic analysis. Is analyzed the diode bridge fed by a unsymmetrical three-phase voltage system using analytical method. Consider the general case and more individual cases. Below presents the PDIODE computer program, computer simulation method and experimental measurements performed. Then analyzes the diode bridge feeding a complex load. At the end of chapter is proposed a non-symmetry global coefficient of three-phase systems.

The second chapter treats the run of a three-phase asynchronous motor in unsymmetrical operation regimes. In particular are studied the operation of a three-phase asynchronous motors in case of one interrupted phase for a motor with non-accessible neutral point star-connected stator winding and for a motor with delta-connected stator winding. Presents various methods and devices for anti-biphasic protecting asynchronous three-phase motors achieved worldwide. At the end of chapter is proposed a anti-biphasic protection device running on a new principle. This anti-biphasic protection device was developed and patented.

The third chapter resumes and deepens the study of non-symmetric feed diode-bridge. This chapter is in fact a collection of articles regarding this subject that were previously published in various scientific journals and other publications. This is a benefit to the reader, because each article in the chapter is fairly independent of the others and therefore can be read directly. On the other hand, this approach inevitably leads to some repetitions in the text. Overall, this section presents the analytical study of unsymmetrically fed three-phase diode bridge, using a computer program for this purpose, study of diode-bridge fed by particular non-symmetrical voltage systems, experimental and synthetic aspects regarding unsymmetrically fed three-phase diode bridge and insert a non-symmetry global coefficient of three-phase systems. The end of this section presents a considerations upon a relay of protecting asynchronous three-phase motors.

A table showing where articles have previously been published is included as an annex. The bibliography is attached at the end of the book.

This book will be of particular interest to students, to engineers specializing in the theory of electrical circuits, and generally to all other readers captivated by the theoretical and applied electrotechnics generally, by the electrical circuits theory particularly.

Certainly, the contents of this book can be improved and enriched in the future. As such, I will be grateful for any comments or suggestions received from the readers.

CUPRINS

Prefață.....	3
Prefață (în limba engleză)	4
Cuprins	5
Cuprins (în limba engleză)	6
<u>Capitolul 1.</u> Caracterizarea sistemelor trifazate nesimetrice cu ajutorul analizei armonice	7
1.1 Puntea de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni.....	9
1.1.1 Metoda analitică	9
1.1.2 Program de calculator PDIODE.....	29
1.1.3 Metoda simulării pe calculator	31
1.1.4 Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator	32
1.1.5 Măsurători experimentale.....	36
1.2 Puntea de diode alimentând o sarcină complexă.....	38
1.2.1 Metoda analitică	38
1.2.2 Metoda simulării pe calculator	49
1.2.3 Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator	50
1.3 Introducerea unui coeficient global de nesimetrie (CGN)	56
1.3.1 Punerea problemei	56
1.3.2 Analiza generală pe cazuri	57
1.3.3 Analiza unor cazuri particulare	61
1.3.4 Cazul sistemelor de secvență inversă	62
1.3.5 Program de calculator pentru analiza sistemelor trifazate nesimetrice (SISNES)	62
1.3.6 Program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (VARK)	64
1.4 Concluzii și observații	72
<u>Capitolul 2.</u> Aplicație-Realizarea unui dispozitiv de protecție antibifazică.....	73
2.1 Regimuri nesimetrice sau dezechilibrate la funcționarea unui motor asincron trifazat.....	75
2.2. Funcționarea motoarelor asincrone trifazate cu o fază întreruptă	76
2.2.1 Întreruperea unei faze pentru un motor cu înfășurarea statorică conectată în stea cu nulul izolat	77
2.2.2 Întreruperea unei faze pentru un motor cu înfășurarea statorică conectată în triunghi	79
2.3 Realizarea protecției antibifazice	80
2.4 Concepția, proiectarea și realizarea unui dispozitiv de protecție antibifazică funcționând pe baza unui principiu nou	82
2.5 Concluzii și observații	86
<u>Capitolul 3.</u> Articole privind puntea de diode alimentată nesimetric.....	89
Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric	91
Studiul punții de diode alimentată nesimetric	97
Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni	99
Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric	103
Coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate	109
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors	119
ANEXA	121
Tabel care indică unde au mai fost publicate articolele	123
Bibliografie.....	125

CONTENTS

Preface (in Romanian).....	3
Preface (in English).....	4
Contents (in Romanian)	5
Contents (in English).....	6
<u>Chapter 1.</u> Characterization Unsymmetrical Three-Phase Systems Using Harmonic Analysis.....	7
1.1 The Diode Bridge Fed by a Unsymmetrical Voltage System	9
1.1.1 The Analytical Method.....	9
1.1.2 PDIODE Computer Program	29
1.1.3 Computer Simulation Method.....	31
1.1.4 Comparison of Results Obtained by Analytical Method and by Computer Simulation Method.....	32
1.1.5 Experimental Measurements	36
1.2 The Diode Bridge Feeding a Complex Load	38
1.2.1 The Analytical Method.....	38
1.2.2 Computer Simulation Method	49
1.2.3 Comparison of Results Obtained by Analytical Method and by Computer Simulation Method.....	50
1.3 Intoduction a Non-Symmetry Global Coefficient (CGN).....	56
1.3.1 Implementation Problem	56
1.3.2 General Analysis of the Cases.....	57
1.3.3 Analysis of Individual Cases.....	61
1.3.4 The Case of Reverse Sequence Systems	62
1.3.5 Computer Program for Unsymmetrical Three-Phase Systems Analysis (SISNES)	62
1.3.6 Computer Program for Representation of Non-Symmetry Global Coefficient Variation (VARK).....	64
1.4 Conclusions and Observations	72
<u>Chapter 2.</u> Application-Development of a Anti-biphasic Protection Device.....	73
2.1 Unsymmetrical or Unbalanced Operation Regimes of a Three-Phase Asynchronous Motor	75
2.2 The Operation of a Three-Phase Asynchronous Motors in Case of One Interrupted Phase.....	76
2.2.1 The Interruption of One Phase in Case a Motor with Non-Accessible Neutral Point Star- Connected Stator Winding	77
2.2.2 The Interruption of One Phase in Case a Motor with Delta-Connected Stator Winding	79
2.3 Development of a Anti-biphasic Protection	80
2.4 Conception, Design and Implementation of a Anti-biphasic Protection Device Running on a New Principle	82
2.5 Conclusions and Observations	86
<u>Chapter 3.</u> Articles Regarding the Unsymmetrically Fed Diode Bridge.....	89
The Analytical Study of Unsymmetrically Fed Three-Phase Diode Bridge	91
The Study of Non-Symmetric Feed Diode-Bridge	97
Study of Diode-Bridge Fed by Particular Non-Symmetrical Voltage Systems	99
Experimental and Synthetic Aspects Regarding Unsymmetrically Fed Threhee-Phase Diode Bridge	103
Non-Symmetry Global Coefficient of Three-Phase Systems	109
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors	119
ANNEX	121
Table showing where the articles have been previously published	123
Bibliography.....	125

CAPITOLUL 1
CARACTERIZAREA SISTEMELOR TRIFAZATE
NESIMETRICE CU AJUTORUL ANALIZEI
ARMONICE

1. CARACTERIZAREA SISTEMELOR TRIFAZATE

NESIMETRICE CU AJUTORUL ANALIZEI ARMONICE

1.1 Puntea de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta o metodă analitică exactă de calcul, o metodă de simulare pe calculator și o comparație între rezultatele obținute prin cele două metode [A1], [G7], [L2], [P19], [R13], [S3], [S4], [S5], [S7], [W3].

Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

De asemenea, vom prezenta rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate în laborator.

1.1.1 Metoda analitică

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig. 1.1).

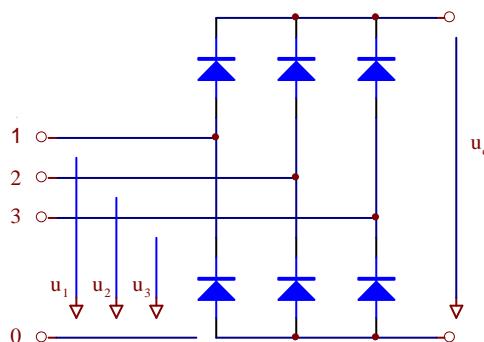


Fig. 1.1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3) . Tensiunea redresată este u_d .

1.1.1.1 Considerarea cazului general. Teorema pozițiilor

Se consideră sistemul trifazat nesimetric general (u_1, u_2, u_3) de secvență directă. Sistemul este nesimetric la modul general, deci prezintă nesimetrie atât de module cât și de unghiuri.

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases} \quad (1.1)$$

unde am notat $x = \omega t$ [M17], [S22], [S29], [T2].

Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$, care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right)$. Mai exact:

- a corespunde la $u_2 \cap u_3$
- b corespunde la $u_3 \cap u_1$
- c corespunde la $u_1 \cap u_2$

Acstea abscise rezultă din următoarele ecuații:

$$u_2(x) = u_3(x); \quad u_3(x) = u_1(x); \quad u_1(x) = u_2(x);$$

Rezolvând aceste ecuații, se obțin următoarele expresii:

$$\begin{aligned} \tan a &= \frac{U_{m2} \sin x_2 - U_{m3} \sin x_3}{U_{m2} \cos x_2 - U_{m3} \cos x_3} \\ \tan b &= \frac{U_{m3} \sin x_3 - U_{m1} \sin x_1}{U_{m3} \cos x_3 - U_{m1} \cos x_1} \\ \tan c &= \frac{U_{m1} \sin x_1 - U_{m2} \sin x_2}{U_{m1} \cos x_1 - U_{m2} \cos x_2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

De aici rezultă imediat a, b, c [P19].

Fără a restrânge generalitatea, alegem ca origine de fază mărimea având amplitudinea maximă și fie u_1 această mărime.

Deci $x_1 = 0; 0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ și $0 < U_{m2} \leq U_{m1}; 0 < U_{m3} \leq U_{m1}$. În această situație putem lua $U_{m1} = 1$ iar U_{m2}, U_{m3} vor fi numere pozitive subunitare.

Se pot imagina și sisteme trifazate la limită, în care pot interveni unele din următoarele situații: $U_{m2} = 0; U_{m3} = 0; x_2 = 0; x_2 = x_3; x_3 = 2\pi$. Aceste sisteme posedă o nesimetrie accentuată.

În aceste condiții (mărimea cu amplitudinea maximă este U_1 și se alege origine de fază) se constată că pot exista 4 cazuri privind poziția relativă a numerelor a, b, c. Vom numi această afirmație teorema pozitieiilor.

Teorema pozitieiilor poate fi ilustrată prin metoda grafică. Din cele $3! = 6$ situații trebuie să scădem 2 datorită poziției privilegiate a lui U_1 (origine de fază). Demonstrația teoremei pozitieiilor este dată în anexele prezentei lucrări.

Cazurile care pot să existe, după poziția relativă a numerelor a, b, c, sunt următoarele:

Cazul 1: $a < b < c$;

Cazul 2: $a < c < b$;

Cazul 3: $b < c < a$;

Cazul 4: $c < b < a$.

În situații particulare, poate interveni egalitatea între două din numerele a, b, c, de asemenea egalitatea unuia din aceste numere cu $-\frac{\pi}{2}$ sau $+\frac{\pi}{2}$.

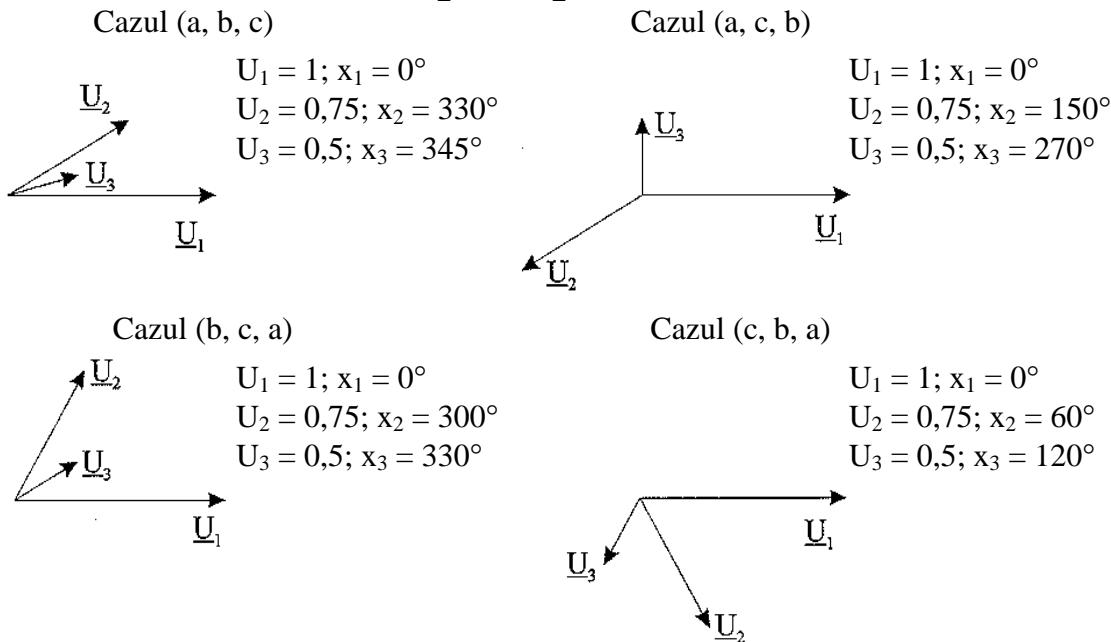


Fig. 1.2 Exemplificări pentru cele patru cazuri de sisteme nesimetrice

În figura 1.2 s-au reprezentat fazorial 4 sisteme la modul general, deci cu nesimetrie atât de module cât și de unghiuri. Sistemele considerate reprezintă cele patru cazuri care pot exista și care au fost prezentate mai înainte.

În toate cazurile, vom nota cu d suma dintre abscisa cea mai mică și numărul π :

$$d = \min(a, b, c) + \pi \quad (1.3)$$

În fiecare din cele 4 cazuri, semnalul $u_d(x)$ rezultă periodic cu perioada π [P19].

Expresia generală a dezvoltării funcției $u_d(x)$ în serie Fourier este dată de următoarea relație:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n \frac{\pi}{l} x + b_n \sin n \frac{\pi}{l} x \quad (1.4)$$

unde $2l = \pi$ este perioada. [M17], [S17], [S22], [S29].

Deci:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos 2nx + b_n \sin 2nx \quad (1.5)$$

În continuare, vom studia pe rând cele patru cazuri.

Cazul 1

Acest caz îl numim pe scurt cazul (a, b, c).

Avem $a < b < c < d$.

În figura 1.3 s-a prezentat sistemul nesimetric (u_1 , u_2 , u_3) funcție de x , precum și tensiunea $u_d(x)$.

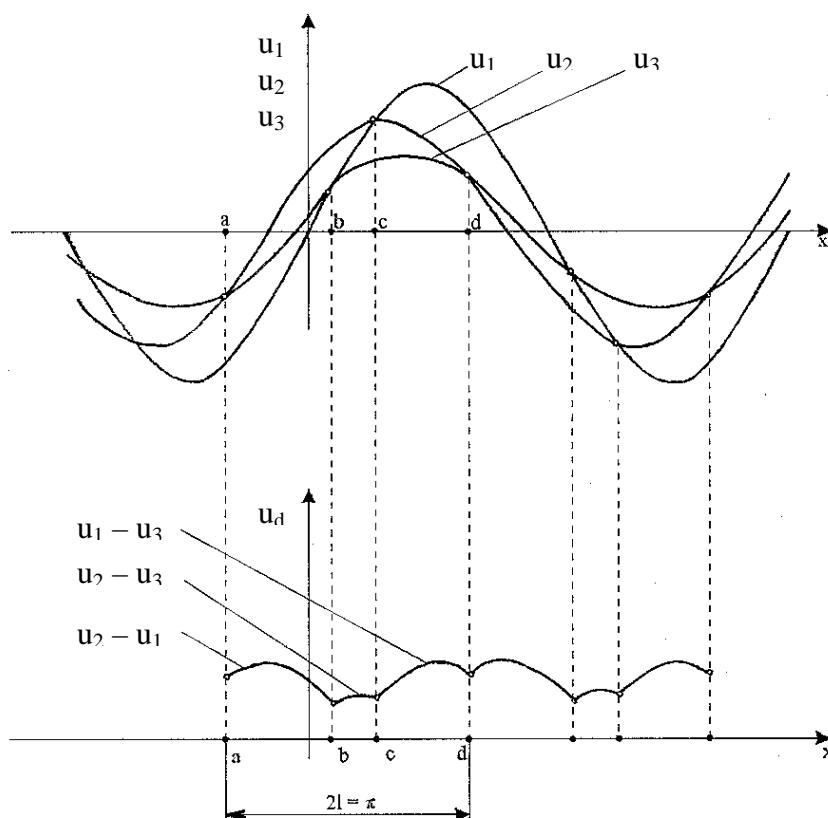


Fig. 1.3 Sistem nesimetric aparținând cazului 1 și tensiunea u_d corespunzătoare

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < b \\ u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < d \end{cases} \quad (1.6)$$

Coeficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx \end{aligned} \quad (1.7)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 :

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi a_n &= \\ &= -U_{m1} \{(2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1]\} \\ &\quad - U_{m1} \{(2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1]\} \\ &\quad - U_{m2} \{(2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2]\} \\ &\quad + U_{m2} \{(2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2]\} \\ &\quad + U_{m3} \{(2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3]\} \\ &\quad + U_{m3} \{(2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3]\} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi b_n &= \\ &= -U_{m1} \{(2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1]\} \\ &\quad - U_{m1} \{(2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1]\} \\ &\quad - U_{m2} \{(2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2]\} \\ &\quad + U_{m2} \{(2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2]\} \\ &\quad + U_{m3} \{(2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3]\} \\ &\quad + U_{m3} \{(2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3]\} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
 -\pi a_0 &= \\
 = -U_{m1} [\cos(b-x_1) + \cos(c-x_1)] - \\
 - U_{m2} [\cos(a-x_2) - \cos(c-x_2)] \\
 + U_{m3} [\cos(a-x_3) + \cos(b-x_3)] \tag{1.10}
 \end{aligned}$$

Cazul 2

Acestr caz îl numim pe scurt cazul (a, c, b).

Avem $a < c < b < d$.

În figura 3.4 s-a reprezentat sistemul nesimetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x precum și tensiunea $u_d(x)$.

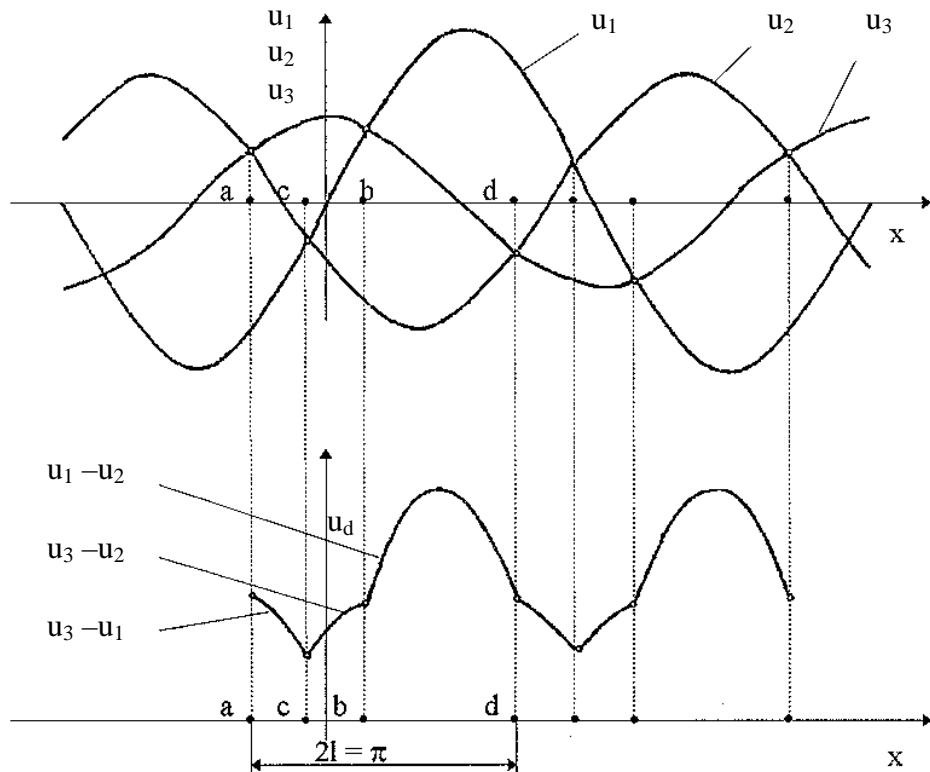


Fig. 1.4 Sistemul nesimetric aparținând cazului 2 și tensiunea u_d corespunzătoare

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_3(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < c \\ u_3(x) - u_2(x), & \text{pentru } c \leq x < b \\ u_1(x) - u_2(x), & \text{pentru } b \leq x < d \end{cases} \tag{1.11}$$

Coeficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx \\
 a_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx \\
 b_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned}
 (4n^2 - 1) \pi a_n &= \\
 &= -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\
 &\quad - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\
 &\quad + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\
 &\quad + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\
 &\quad - U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \\
 &\quad + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \}
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned}
 (4n^2 - 1) \pi b_n &= \\
 &= -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\
 &\quad - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\
 &\quad + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\
 &\quad + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\
 &\quad - U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \} \\
 &\quad + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \}
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
 -\pi a_0 &= \\
 &= -U_{m1} [\cos(c - x_1) + \cos(b - x_1)] \\
 &\quad + U_{m2} [\cos(a - x_2) + \cos(c - x_2)] \\
 &\quad - U_{m3} [\cos(a - x_3) - \cos(b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

Cazul 3

Acest caz îl numim pe scurt cazul (b, c, a).

Avem: $b < c < a < d$.

În figura 1.5 s-a reprezentat sistemul nesimetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x precum și tensiunea $u_d(x)$.

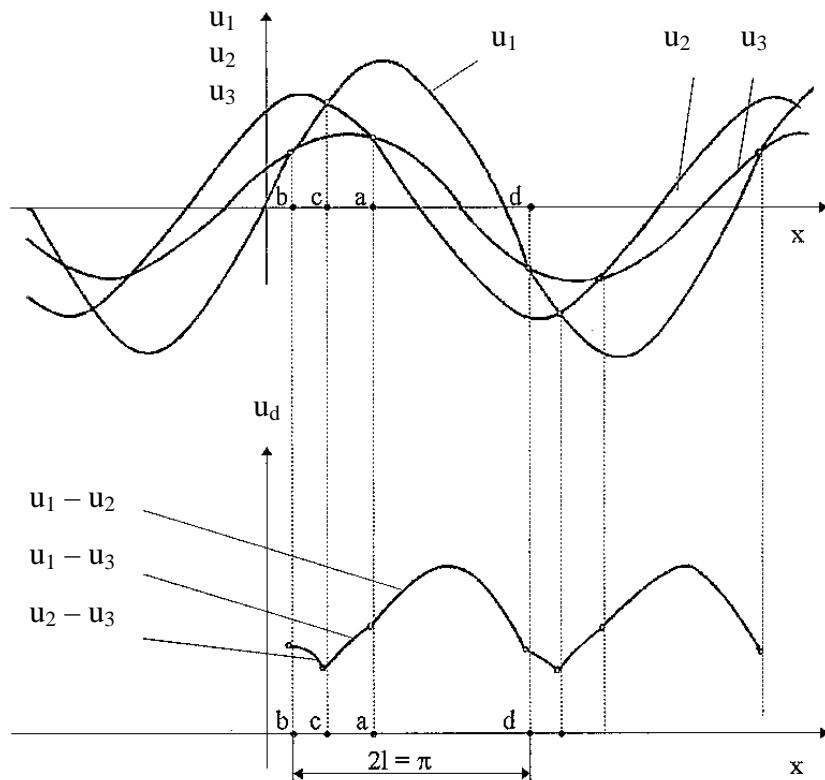


Fig. 1.5 Sistem nesimetric aparținând cazului 3 și tensiunea u_d corespunzătoare

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < a \\ u_1(x) - u_2(x), & \text{pentru } a \leq x < d \end{cases} \quad (1.16)$$

Coefficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_b^d u_d(x) dx \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_b^d u_d(x) \cos 2nx dx \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_b^d u_d(x) \sin 2nx dx \end{aligned} \quad (1.17)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned}
 & (4n^2 - 1) \pi a_n = \\
 & = -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\
 & \quad - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\
 & \quad + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\
 & \quad + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\
 & \quad + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \} \\
 & \quad - U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \}
 \end{aligned} \tag{1.18}$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned}
 & (4n^2 - 1) \pi b_n = \\
 & = -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\
 & \quad - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\
 & \quad + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\
 & \quad + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\
 & \quad + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \} \\
 & \quad - U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \}
 \end{aligned} \tag{1.19}$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
 & -\pi a_0 = \\
 & = -U_{m1} [\cos(c - x_1) + \cos(b - x_1)] \\
 & \quad + U_{m2} [\cos(c - x_2) + \cos(a - x_2)] \\
 & \quad + U_{m3} [\cos(b - x_3) - \cos(a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

Cazul 4

Acest caz îl numim pe scurt cazul (c, b, a).

În figura 3.6 s-a reprezentat sistemul nesimetric (u_1 , u_2 , u_3) funcție de x precum și tensiunea $u_d(x)$.

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_3(x) - u_2(x), & \text{pentru } c \leq x < b \\ u_1(x) - u_2(x), & \text{pentru } b \leq x < a \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } a \leq x < d \end{cases} \tag{1.21}$$

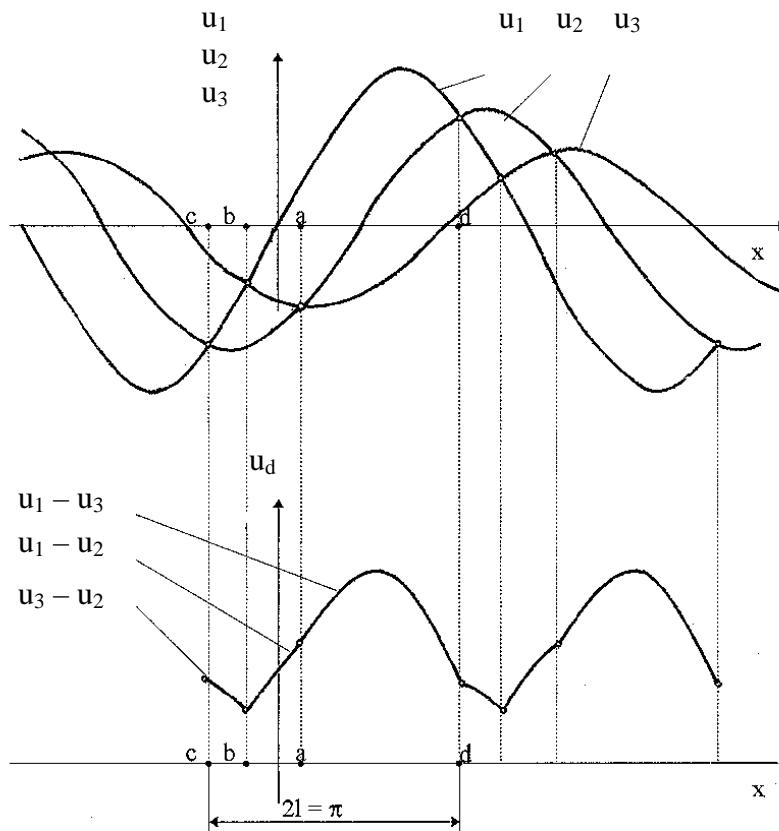


Fig. 1.6 Sistem nesimetric aparținând cazului 4 și tensiunea u_d corespunzătoare

Coefficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_c^d u_d(x) dx \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_c^d u_d(x) \cos 2nx dx \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_c^d u_d(x) \sin 2nx dx \end{aligned} \quad (1.22)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi a_n &= \\ &= -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\ &\quad - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\ &\quad + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\ &\quad - U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\ &\quad + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \} \\ &\quad + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \end{aligned} \quad (1.23)$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned}
 & (4n^2 - 1) \pi b_n = \\
 & = -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\
 & - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\
 & + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\
 & - U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\
 & + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \} \\
 & + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \}
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
 & -\pi a_0 = \\
 & = -U_{m1} [\cos(b - x_1) + \cos(c - x_1)] \\
 & + U_{m2} [\cos(c - x_2) + \cos(a - x_2)] \\
 & + U_{m3} [\cos(b - x_3) - \cos(a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.25}$$

1.1.1.2 Cazul sistemului simetric

În acest caz particular (caz limită) avem:

$$\begin{aligned}
 U_{m1} &= U_{m2} = U_{m3} = U_m \\
 x_1 &= 0; x_2 = \frac{2\pi}{3}; x_3 = \frac{4\pi}{3}
 \end{aligned} \tag{1.26}$$

În figura 1.7 este reprezentat fazorial sistemul simetric:

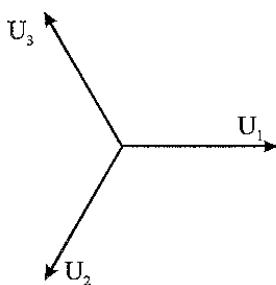


Fig. 1.7 Sistem simetric de tensiuni (reprezentare fazorială)

În figura 1.8 s-a reprezentat sistemul simetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x , precum și tensiunea $u_d(x)$.

În acest caz se obține:

$$a = -\frac{\pi}{2}; c = -\frac{\pi}{6}; b = \frac{\pi}{6}; d = \frac{\pi}{2} \tag{1.27}$$

Particularizând formulele generale (sau abordând direct acest caz) obținem:

$$b_n = 0 \text{ (pentru orice } n\text{).} \tag{1.28}$$

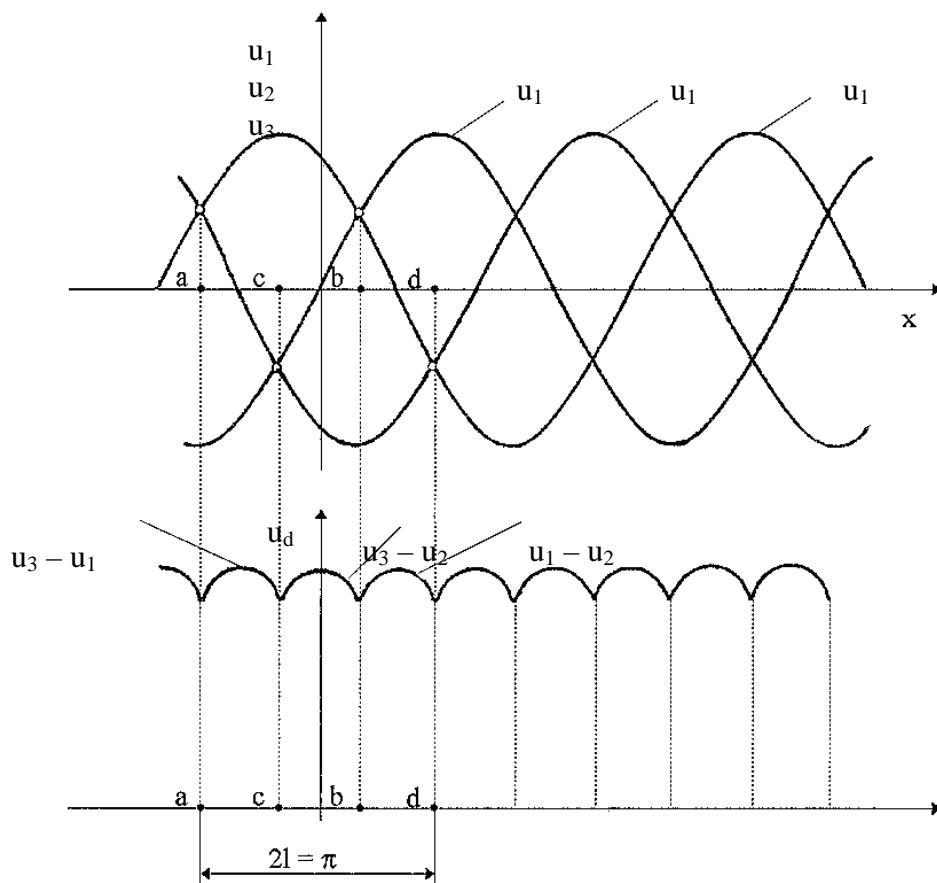


Fig. 1.8 Sistem simetric și tensiunea u_d corespunzătoare

$$a_n = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}(-1)^{k+1} U_m}{\pi(36k^2 - 1)}, & \text{pentru } n = 3k \\ 0, & \text{pentru } n = 3k - 1 \\ 0, & \text{pentru } n = 3k - 2 \end{cases} \quad (1.29)$$

unde $k \geq 1$

$$a_0 = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} \quad (1.30)$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} + \frac{6\sqrt{3}U_m}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{36k^2 - 1} \cos 6kx \quad (1.31)$$

Spectrul de armonici pentru u_d este reprezentat în figura 1.9.

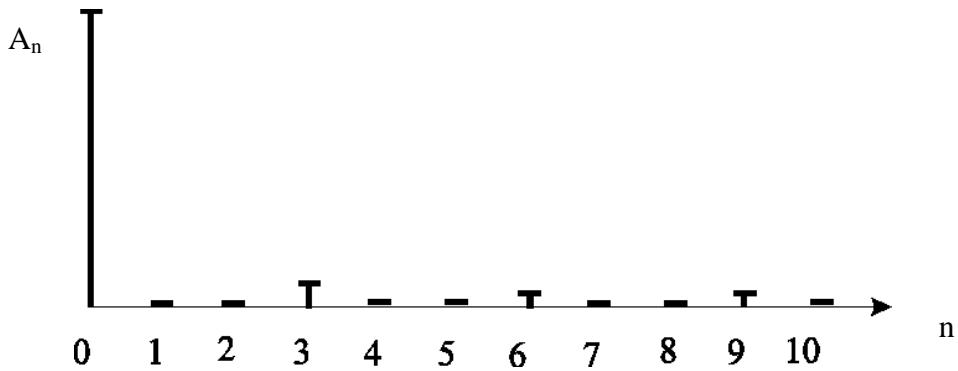


Fig. 1.9 Spectrul de armonici al tensiunii u_d pentru sistemul simetric

Se observă că amplitudinea armonicii corespunde lui $n = 1$ este nulă: $A_1 = 0$. De asemenea, avem și $A_2 = 0$.

1.1.1.3 Cazul nesimetriei de module (de amplitudini)

În acest caz avem:

$$U_{m1} \neq U_{m2} \neq U_{m3}$$

$$\text{dar: } x_2 = \frac{2\pi}{3}, x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (1.32)$$

Toate considerațiile făcute pentru cazul general se particularizează imediat [P19].

$$\text{Notăm: } U_{m2} = \alpha U_{m1} \quad (1.33)$$

$$U_{m3} = \beta U_{m1} \quad (1.34)$$

unde α și β sunt parametri pozitivi, subunitari.

Folosind relațiile generale (2) obținem:

$$\tan a = -\sqrt{3} \cdot \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} \quad (1.35)$$

$$\tan b = \frac{\beta \sqrt{3}}{2 + \beta} \quad (1.36)$$

$$\tan c = -\frac{\alpha \sqrt{3}}{2 + \alpha} \quad (1.37)$$

Se observă că dacă $\alpha > \beta$ ne găsim în cazul (a, c, b) iar dacă $\alpha < \beta$ ne găsim în cazul (c, b, a).

Coeficienții a_1 și b_1 vor depinde de α și β și de asemenea:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = f(\alpha, \beta) \quad (1.38)$$

Calculând gradul de disimetrie și gradul de asimetrie în acest caz, se obține:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_h = \frac{\sqrt{(2-\alpha-\beta)^2 + 3(\alpha-\beta)^2}}{2(1+\alpha+\beta)} \quad (3.39)$$

Dacă se impune $\varepsilon_i = \varepsilon_h \leq 10\%$ se obține domeniul de variație pentru α și β prezentat în figura 1.10. Elipsa are centrul de coordonate $\left(\frac{17}{16}, \frac{17}{16}\right)$, semiaxa mare egală cu $5\sqrt{2}/16 \approx 0,44$ și semiaxa mică $1/4 = 0,25$ [R13].

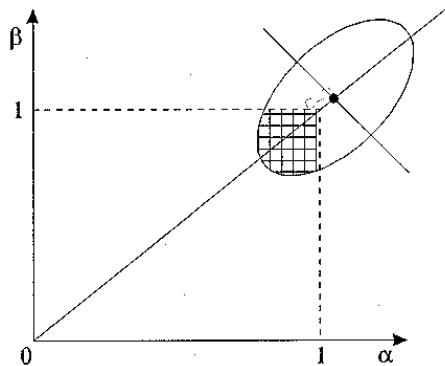


Fig. 1.10 Domeniu de variație pentru α și β la grad de asimetrie și disimetrie impus

În cazul particular $\alpha = \beta$ obținem:

$$\tan a = \pm\infty \quad (1.40)$$

$$\tan b = \frac{\alpha\sqrt{3}}{2+\alpha} \quad (1.41)$$

$$\tan c = \frac{-\alpha\sqrt{3}}{2+\alpha} \quad (1.42)$$

În acest caz $a_1 = f(\alpha)$ iar $b_1 = 0$.

Obținem:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = |a_1| \quad (1.43)$$

De asemenea:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_h = \frac{1-\alpha}{1+2\alpha} \quad (1.44)$$

Dacă se impune $\varepsilon_i = \varepsilon_h \leq 10\%$ se obține:

$$\alpha \geq \frac{3}{4} \quad (1.45)$$

$$\text{și deci } \alpha \in \left[\frac{3}{4}, 1\right] \quad (1.46)$$

Efectuându-se calcule numerice pentru $\varepsilon_i = \varepsilon_h \in [0, 1]$ s-a obținut dependența $A_1/U_{m1} = f(\varepsilon_i)$ reprezentată în figura 1.11.

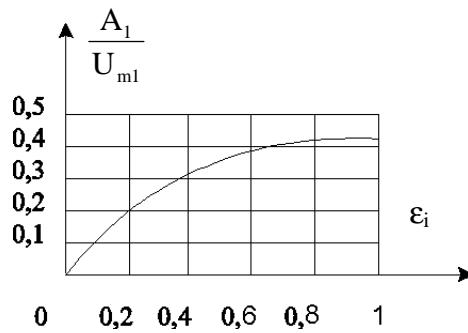


Fig. 1.11 Variația raportului A_1/U_{m1} funcție de ϵ_i

Se observă creșterea coeficientului global de nesimetrie $k_n = A_1/U_{m1}$ odată cu creșterea nesimetriei sistemului, estimată în mod clasic prin gradul de disimetrie egal cu gradul de asimetrie în acest caz. Aceasta este coeficientul global de nesimetrie de ordinul I, deci care ia în considerare numai armonica de ordinul I. El se mai poate nota pentru claritate cu k_{n1} . În continuare, în această lucrare se va introduce coeficientul global de nesimetrie de ordinul II care ține seama și de armonica de ordinul II (k_{n2}). Uneori vom nota mai simplu, $k_{n2} = k_n$.

Acest rezultat confirmă justitia introducerii coeficientului global de nesimetrie ca un indicator al unui sistem trifazat nesimetric [R13], [P19].

1.1.1.4 Cazul nesimetriei de unghiuri (de defazaje)

În acest caz avem:

$$x_2 \neq \frac{2\pi}{3}; x_3 \neq \frac{4\pi}{3}$$

dar:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m \quad (1.47)$$

Și în acest caz formulele și considerațiile generale se particularizează imediat.

Folosind relațiile generale (3.2) obținem:

$$\tan a = -\operatorname{ctg} \frac{x_2 + x_3}{2} \quad (1.48)$$

$$\tan b = -\operatorname{ctg} \frac{x_3}{2} \quad (1.49)$$

$$\tan c = -\operatorname{ctg} \frac{x_2}{2} \quad (1.50)$$

Din inegalitatea $0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ (1.51)

rezultă: $\tan c < \tan b$ (1.52)

ceea ce înseamnă că ne putem găsi în cazul (a, c, b) sau în cazul (c, b, a).

1.1.1.5 Cazul anulării unei tensiuni

Să presupunem că $u_3 = 0$, deci $U_{m3} = 0$. Avem un sistem trifazat la limită, respectiv un sistem accentuat nesimetric.

Vom avea condițiile:

$$\begin{aligned} U_{m1} &= U_{m2} = U_m \\ U_{m3} &= 0 \\ x_1 &= 0; x_2 = \frac{2\pi}{3}; x_3 = \frac{4\pi}{3} \end{aligned} \quad (1.53)$$

În figura 3.12 s-a reprezentat fazorial acest sistem nesimetric iar în figura 3.13 s-au reprezentat u_1 , u_2 , u_3 , u_d funcție de x .

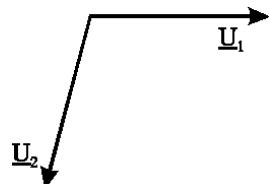


Fig. 1.12 Sistem accentuat nesimetric ($u_3 = 0$), reprezentare fazorială

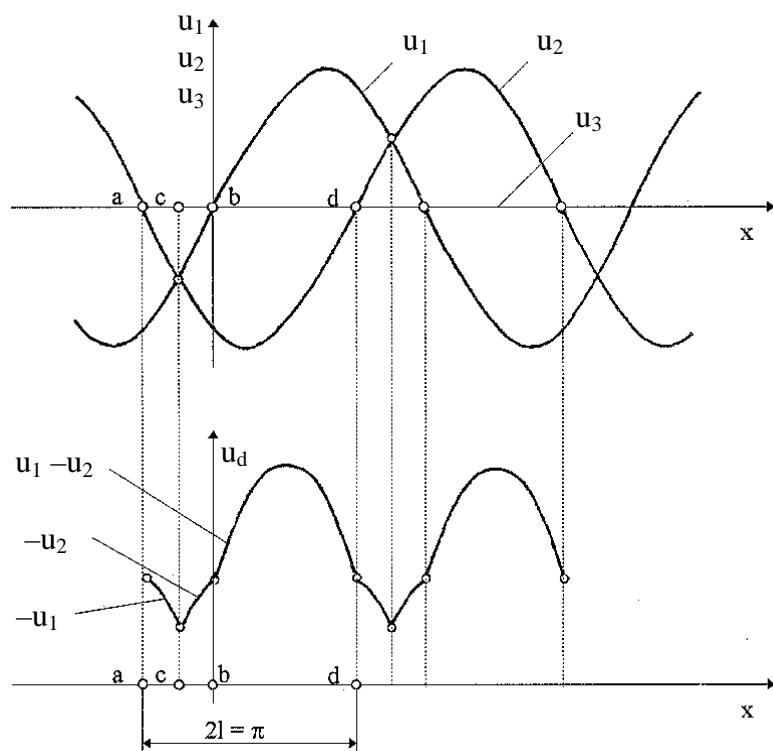


Fig. 1.13 Sistem accentuat nesimetric ($u_3 = 0$) și tensiunea u_d corespunzătoare

Rezultă în acest caz:

$$a = -\frac{\pi}{3}; c = -\frac{\pi}{6}; b = 0; d = \frac{2\pi}{3} \quad (1.54)$$

Din formulele generale se obțin în urma unor calcule următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 :

$$a_n = \frac{U_m}{\pi(4n^2 - 1)} \left[-2 - 2\sqrt{3} \cos \frac{n\pi}{3} - 2 \cos \frac{2n\pi}{3} \right] \quad (1.55)$$

$$b_n = \frac{U_m}{\pi(4n^2 - 1)} \left[2 \sin \frac{2\pi}{3} + 2\sqrt{3} \sin \frac{n\pi}{3} \right] \quad (1.56)$$

$$a_0 = \frac{U_m (2 + \sqrt{3})}{\pi} \quad (1.57)$$

Spectrul de armonici pentru u_d este indicat în figura 3.14.

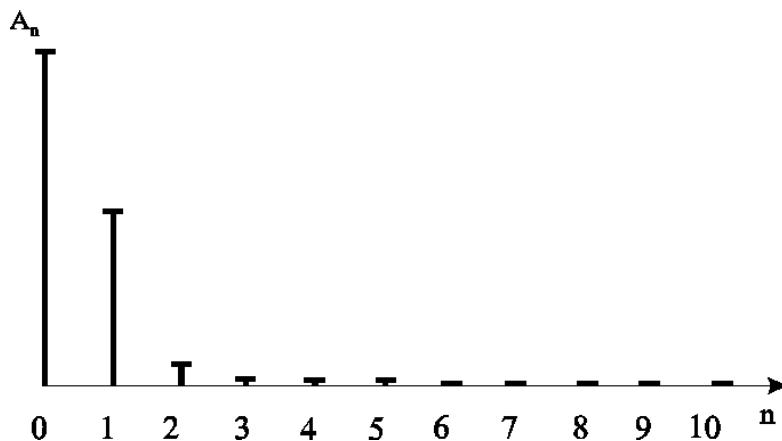


Fig.1.14 Spectrul de armonici al tensiunii u_d pentru sistemul accentuat nesimetric cu $u_3 = 0$

Amplitudinea armonicii fundamentale :

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (1.58)$$

se obține în urma unui calcul.

$$A_1 = \frac{2U_m}{3\pi} \sqrt{4 + 2\sqrt{3}} \quad (1.59)$$

$$A_1 = \frac{2U_m}{3\pi} (1 + \sqrt{3}) \quad (1.60)$$

$$A_1 \approx 0,579 U_m \quad (1.61)$$

1.1.1.6 Cazul anulării a două tensiuni

Să presupunem că $u_3 = 0$; $u_2 = 0$, deci $U_{m3} = U_{m2} = 0$.

Vom avea condițiile:

$$U_{m1} = U_m$$

$$U_{m2} = U_{m3} = 0$$

$$x_1 = 0; x_2 = \frac{2\pi}{3}; x_3 = \frac{4\pi}{3}$$

În figura 1.15 s-a reprezentat fazorial acest sistem nesimetric iar în figura 3.16 s-au reprezentat u_1, u_2, u_3 și u_d funcție de x .

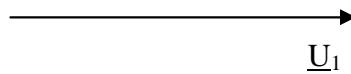


Fig.1.15 Sistem accentuat nesimetric ($u_3 = 0, u_2 = 0$), reprezentare fazorială

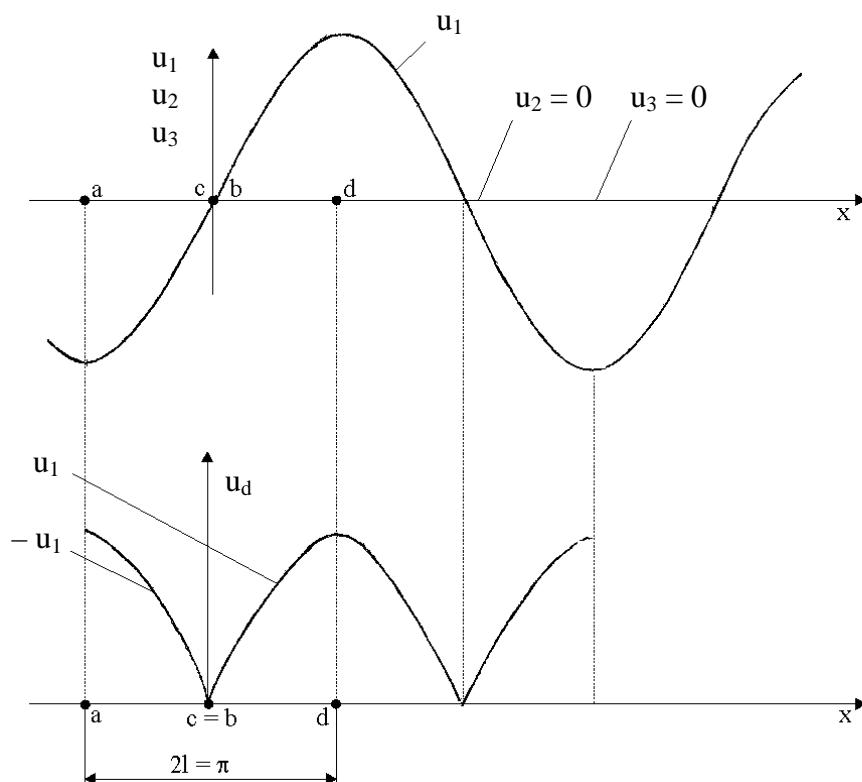


Fig.1.16 Sistem accentuat nesimetric ($u_3 = 0, u_2 = 0$) și tensiunea u_d corespunzătoare

Rezultă în acest caz:

$$a = -\frac{\pi}{2}; b = c = 0; d = \frac{\pi}{2} \quad (1.63)$$

Din formulele generale se obțin următoarele expresii:

$$a_n = -\frac{4U_m}{\pi(4n^2 - 1)} \quad (1.64)$$

$$b_n = 0 \quad (1.65)$$

$$a_0 = \frac{2U_m}{\pi} \quad (1.66)$$

Spectrul de armonici pentru u_d este indicat în figura 1.17.

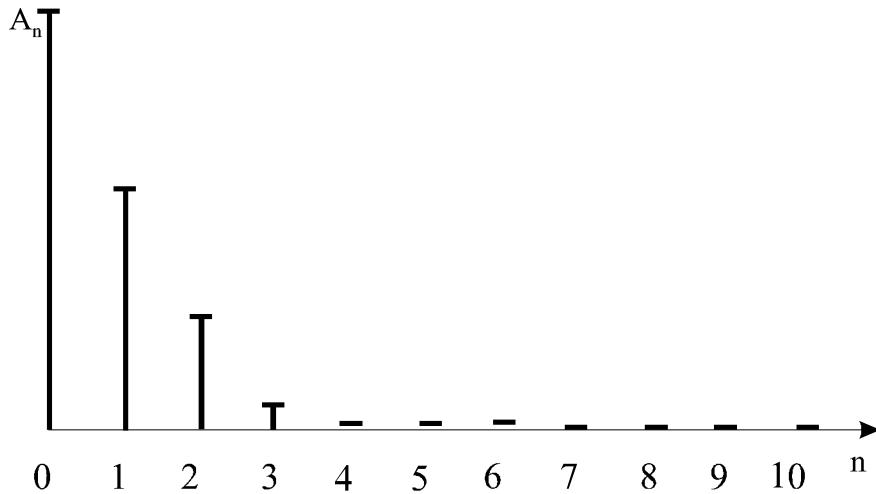


Fig.1.17 Spectrul de armonici al tensiunii u_d pentru sistemul accentuat nesimetric cu $u_3 = 0$, $u_2 = 0$

Amplitudinea armonică fundamentală:

$$A_1 = \frac{4U_m}{3\pi} \quad (1.67)$$

$$A_1 \approx 0,424 U_m \quad (1.68)$$

1.1.1.7 Cazul funcționării monofazate

În acest caz, $u_3 = 0$ deci $U_{m3} = 0$.

Vom avea condițiile:

$$\begin{aligned} U_{m1} &= U_{m2} = U_m \\ U_{m3} &= 0 \\ x_1 &= 0; x_2 = \pi; x_3 \text{ oarecare} \end{aligned} \quad (1.69)$$

În figura 1.18 s-a reprezentat fazorial acest sistem nesimetric iar în figura 1.19 s-au reprezentat u_1 , u_2 , u_3 și u_d funcție de x .

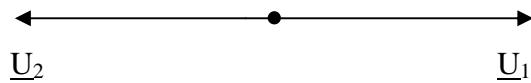


Fig. 1.18 Sistem accentuat nesimetric (cazul funcționării monofazate, reprezentare fazorială)

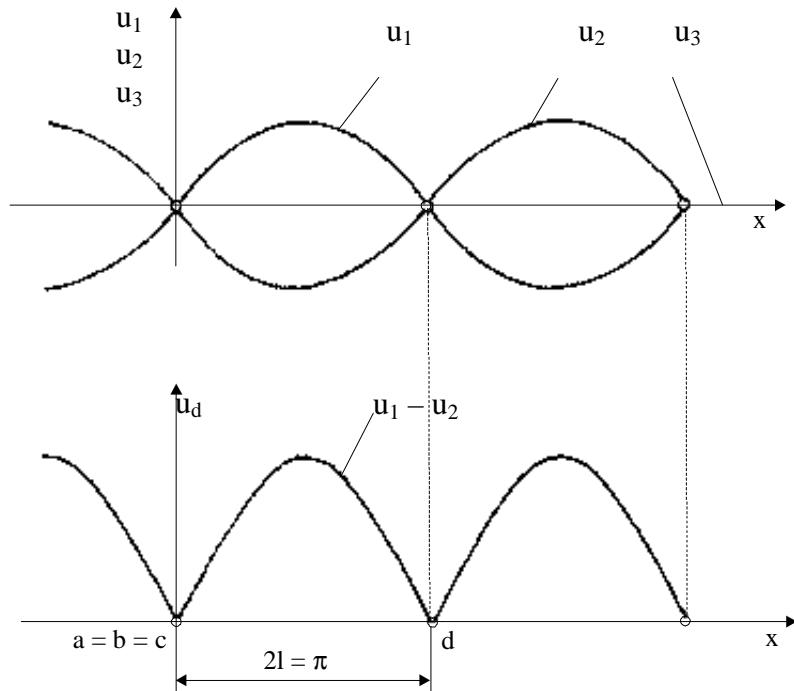


Fig. 1.19 Sistem accentuat nesimetric (cazul funcționării monofazate) și tensiunea u_d corespunzătoare

Rezultă:

$$a = b = c = 0; d = \pi \quad (1.70)$$

Particularizând formulele generale din cazul (a, c, b) sau (b, c, a) obținem:

$$a_n = -\frac{8U_m}{\pi(4n^2 - 1)} \quad (1.71)$$

$$a_0 = \frac{4U_m}{\pi} \quad (1.72)$$

$$b_n = 0 \quad (1.73)$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{4U_m}{\pi} - \frac{8U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nx}{4n^2 - 1} \quad (1.74)$$

Spectrul de armonici pentru u_d este reprezentat în figura 3.20.

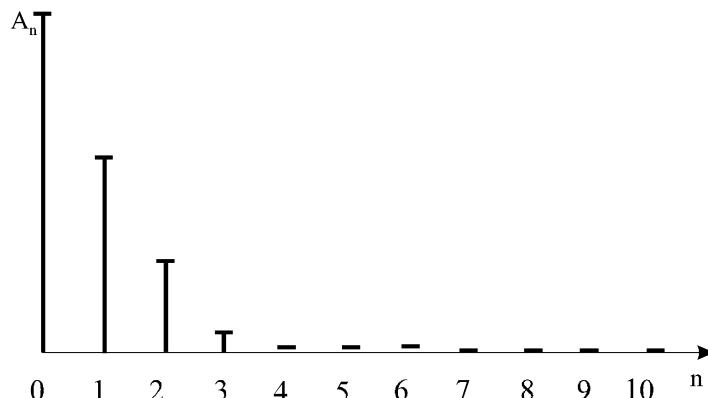


Fig.1.20 Spectrul de armonici al tensiunii u_d pentru sistemul accentuat nesimetric ce corespunde cazului funcționării monofazate

Amplitudinea armonicii fundamentale este:

$$A_1 = \frac{8U_m}{3\pi} \quad (1.75)$$

$$A_1 \approx 0,848 U_m \quad (1.76)$$

1.1.1.8 Sisteme de secvență inversă

Analiza sistemelor de secvență inversă se reduce la analiza sistemelor de secvență directă.

Într-adevăr, în cazul unui sistem de secvență inversă cu $U_{m1} = A$, $U_{m3} = B$, $U_{m2} = C$ și $x_3 = \beta$, $x_2 = \gamma$ va trebui să considerăm sistemul „pereche“ de secvență directă: $U_{m1} = A$, $U_{m2} = B$, $U_{m3} = C$ și $x_2 = \beta$, $x_3 = \gamma$. Coeficienții seriei Fourier aferenți lui u_d vor fi aceiași pentru cele două sisteme [P19].

1.1.2 Program de calculator PDIODE

Pe baza metodei analitice prezentate anterior s-a elaborat un program de calculator (numit **PDIODE**).

Programul elaborat parcurge următoarele etape:

1. Se introduc ca date inițiale parametrii U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , x_1 , x_2 , x_3 ; vom pune întotdeauna $U_{m1} = 1$ și $x_1 = 0$; fazele inițiale se pot exprima în grade sau în radiani (optional).
2. Se calculează U_h , U_d , U_i precum și gradele de asimetrie și disimetrie ϵ_h , ϵ_i , cu ajutorul formulelor cunoscute; acestea vor fi afișate în final.
3. Se calculează numitorii și numărătorii expresiilor pentru calculul numerelor a, b, c; ei sunt notați $n1$, $n2$, $n3$, respectiv $m1$, $m2$, $m3$. Dacă cel puțin unul dintre numitori este zero, se afișează „caz singular de tip 1“ precum și valorile numitorilor. Dacă nu, se calculează numerele a, b, c pe baza relațiilor (3.2).
4. Dacă avem $a = b$ sau $b = c$ sau $c = a$ se afișează „caz singular de tip 2“ precum și valorile lui a, b, c.
5. Dacă nu, se calculează în unul dintre cele 4 cazuri în care ne putem găsi, cu formulele corespunzătoare valorile lui a_0 , a_n , b_n , pentru $n = 1, 2, \dots, 10$. De asemenea, se calculează A_n și se afișează lista coeficienților a_0 , a_n , b_n , A_n precum și a, b, c.
6. Se afișează coeficientul global de nesimetrie $k_n = A_1 + A_2$.
7. Se afișează reprezentarea grafică a spectrului lui u_d (amplitudinile funcție de ordinul armonicii respective).

Listingul programului **PDIODE** este prezentat în anexele prezentei lucrări, ca și o serie de rezultate obținute prin utilizarea programului.

Ecranul programului **PDIODE** este prezentat în figura 1.21. S-a considerat sistemul trifazat nesimetric de tensiuni caracterizat de următorii parametri: $U_{m1} = 1$, $U_{m2} = 0,75$, $U_{m3} = 0,5$; $x_1 = 0^\circ$, $x_2 = 150^\circ$, $x_3 = 270^\circ$ (care reprezintă cazul acb) aplicat asupra unei punți de diode ideale. S-a obținut analiza armonică a tensiunii u_d (fig.1.21.a) și reprezentarea spectrului de armonici (fig. 1.21.b).

PROGRAM PENTRU ANALIZA PUNTII DE DIODE IDEALE ALIMENTATE CU UN SISTEM NESIMETRIC DE TENSIUNI (PDIODE).

Introduceti valorile tensiunilor , $Um1,Um2,Um3:1 0.75 0.5$

Alegeti exprimarea fazelor in radiani sau grade [r/g]:g

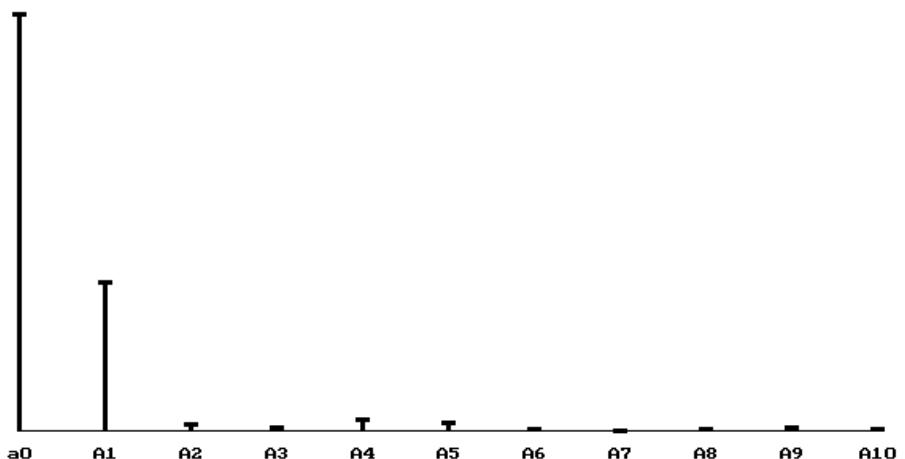
Introduceti valorile fazelor initiale , $x1,x2,x3:0 150 270$

```
a=-9.3223663069E-01 b= 4.6364760900E-01 c =-2.2353961103E-01
$intem in cazul : acb
a0= 1.2412070235E+00
a1=-3.9910117761E-01    b1= 1.8673781197E-01    A1= 4.4062768909E-01
a2= 6.8289869380E-03    b2=-1.5205778986E-02    A2= 1.6668856505E-02
a3=-3.2567712774E-03    b3= 1.0190115325E-02    A3= 1.0697897433E-02
a4= 8.9668533640E-03    b4= 3.2923918075E-02    A4= 3.4123142304E-02
a5= 1.4224891016E-02    b5= 1.6447888970E-02    A5= 2.1745817436E-02
a6= 2.0848083423E-03    b6= 1.8542852677E-03    A6= 2.7901253876E-03
a7=-1.1967117158E-03    b7= 9.7157456710E-04    A7= 1.5414525845E-03
a8= 4.5626173602E-03    b8=-2.3736831050E-03    A8= 5.1431360724E-03
a9= 4.1860762919E-03    b9=-6.4031959158E-03    A9= 7.6501080161E-03
a10= 7.0674286465E-04   b10=-3.2440767011E-03   A10= 3.3201685378E-03
Coeficientul global de nesimetrie kn= 4.5729654559E-01

epsilon_h= 1.7113799853E-01 epsilon_i= 3.4768005591E-01
```

a)

acb



b)

Fig.1.21 Ecranul programului PDIODE (a – analiza armonică, b – spectrul)

1.1.3 Metoda simulării pe calculator

Pentru modelarea și simularea pe calculator a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având ca sarcină o rezistență pură, am utilizat produsul soft **PSPICE** al firmei MicroSim Corporatin (SUA).

În figura 1.22 este prezentată schema electrică a unei punți trifazate de diode, cu numerotarea corespunzătoare a nodurilor.

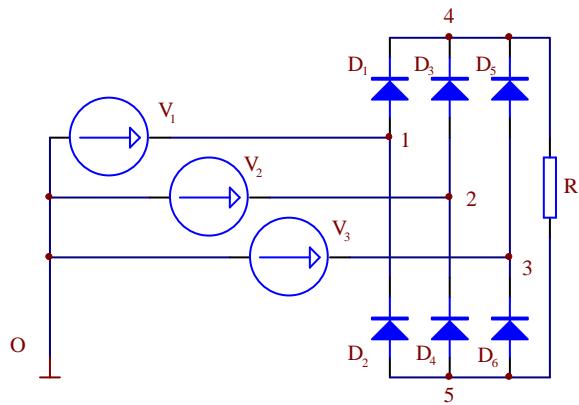


Fig. 1.22 Puntea de diode pentru modelarea PSPICE

Fiecare dintre tensiunile V₁, V₂, V₃ au fost generate în cadrul programului **PSPICE** folosind instrucțiunea pentru specificarea surselor de tensiune sinusoidală SIN.

Sintaxa acestei instrucțiuni este:

SIN (< vo > < va > < f > < td > < df > < faza >)

și poate defini pe cazul cel mai general un semnal sinusoidal amortizat.

Explicitarea parametrilor din instrucțiunea de mai sus este următoarea:

Parametri	Valoarea implicită	Unitate
vo – tensiunea de offset	–	volt
va – amplitudinea	–	volt
f – frecvența	1/TSTOP	hertz
td – întârzierea	0	secunde
df – factor de amortizare	0	secunde
faza – defazajul semnalului	0	grade

Am folosit vo = 0, td = 0, df = 0.

Utilizăm diode pentru care sunt specificați în cadrul instrucțiunii .MODEL parametrii de model: IS (currentul de saturatie al jonctiunii) și BV (tensiunea de străpungere a jonctiunii).

S-a utilizat modelul de diodă:

MODEL DI D($IS = 2e - 15$ $BV = 1000$)

Rezistența de sarcină R_1 are valoarea $1\text{ k}\Omega$

Folosind modelul de punte prezentat mai sus, s-a făcut analiza **PSPICE** pentru mai multe cazuri, rezultându-se următoarele:

- analiza tranzitorie (cu pasul 5 ms) pentru mărimele $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$;
- reprezentarea funcției de timp a mărimerilor $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$, pe intervalul 0...40 ms;
- analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5)$;
- reprezentarea spectrului de armonici pentru mărimea $V(4,5)$.

Rezultatele obținute în urma analizei cu programul **PSPICE** concordă cu rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE** care are la bază această metodă).

În continuare vom prezenta detaliat numai analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5) = u_d$. Mai exact, vom prezenta într-un tabel rezultatele obținute cu metoda analitică și cu metoda simulării **PSPICE** pentru componenta continuă și primele patru armonici, precum și o comparație între aceste rezultate. În cazul simulării **PSPICE**, amplitudinea tensiunii maxime $V(1)$ este de 100 V și prin urmare rezultatele metodei analitice au fost amplificate de 100 de ori pentru a fi comparate cu aceleia de la analiza Fourier, unde s-a considerat $U_{m1} = 100\text{V}$. Prin alegerea acestei tensiuni de 100 V s-a urmărit reducerea erorii produse de căderea de tensiune pe diode în conducție directă (de cca. 0,8 V). Frecvența centrală a analizei Fourier a fost de 50 Hz.

1.1.4 Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator

S-au analizat prin ambele metode opt cazuri particulare care sunt prezentate în continuare, cu notățile de la modelarea **PSPICE**.

1. Cazul sistemului simetric:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V_1	100 V	0°
V_2	100 V	-120°
V_3	100 V	-240°

2. Cazul sistemului nesimetric (anularea unei tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-120°
V3	0 V	-240°

3.Cazul sistemului nesimetric (anularea a două tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	0 V	-120°
V3	0 V	-240°

4. Cazul sistemului nesimetric (funcționare monofazată)

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-180°
V3	0 V	0°

5. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-330°
V3	50 V	-345°

6. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-150°
V3	50 V	-270°

7. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-300°
V3	50 V	-330°

8. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-60°
V3	50 V	-120°

Rezultatele obținute sunt trecute în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1.

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru $V(4,5)$	Metoda analitică (programul PDIODE) (V)	Metoda simulării pe calculator (PSPICE) (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a_0	165,3	163,3	-1,2
	100	A_1	-	-	-
	200	A_2	-	-	-
	300	A_3	9,5	9,5	-
	400	A_4	-	-	-
Sistemul 2 ($V_3 = 0$)	0	a_0	118,7	116,8	-1,6
	100	A_1	57,9	57,3	-1
	200	A_2	3,1	3,1	-
	300	A_3	0,5	0,49	-2
	400	A_4	0,73	0,72	-1,3
Sistemul 3 ($V_3 = 0, V_2 = 0$)	0	a_0	63,8	61,9	-2,9
	100	A_1	42,4	41,8	-1,4
	200	A_2	8,5	8,4	-1,1
	300	A_3	3,6	3,5	-2,8
	400	A_4	2,02	1,96	2,9
Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	127,3	125,3	-1,5
	100	A_1	84,8	83,7	-1,2
	200	A_2	16,9	16,4	-2,9
	300	A_3	7,2	7,0	-2,7
	400	A_4	4,04	3,95	-2,2

Tabelul 1.1.(continuare)

Sistemul trifazat Aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru $V(4,5)$	Metoda analitică (programul PDIODE) (V)	Metoda simulării pe calculator (PSPICE) (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 5 (caz (a,b,c))	0	a_0	42,7	41,9	-1,8
	100	A_1	12,4	12,3	-0,8
	200	A_2	3,05	2,97	-2,6
	300	A_3	0,82	0,8	-2,4
	400	A_4	0,45	0,44	-2,2
Sistemul 6 (caz (a,c,b))	0	a_0	124,1	122,2	-1,5
	100	A_1	44,0	43,5	-1,1
	200	A_2	1,66	1,62	-2,4
	300	A_3	1,07	1,10	2,8
	400	A_4	3,41	3,31	-2,9
Sistemul 7 (caz (b,c,a))	0	a_0	61,2	59,5	-2,7
	100	A_1	31,2	30,8	-1,2
	200	A_2	2,96	2,89	-2,3
	300	A_3	1,24	1,21	-2,4
	400	A_4	0,56	0,55	-1,7
Sistemul 8 (caz (c,b,a))	0	a_0	91,8	89,9	-2,0
	100	A_1	42,6	42,1	-1,1
	200	A_2	3,05	2,98	-2,2
	300	A_3	1,42	1,38	-2,8
	400	A_4	0,99	1,01	-2,0

După cum se observă, rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**, bazat pe metoda analitică) și prin metoda simulării pe calculator (**PSPICE**) sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9 %.

1.1.5 Măsurători experimentale

Pentru verificarea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator s-au măsurat experimental armonicile tensiunii u_d în cazurile prezentate în paragrafele 1.1.1.2 (cazul sistemului simetric), 1.1.1.5 (cazul anulării unei tensiuni), 1.1.1.6 (cazul anulării a două tensiuni) și 1.1.1.7 (cazul funcționării monofazate).

S-a utilizat un nanovoltmetru selectiv UNIPAN-tip 233 (Polonia) cu următoarele date tehnice principale:

- intrare: $1\mu V \dots 100 \text{ mV}$
- divizor al tensiunii de intrare: $1 : 1000$
- frecvență: $1,5 \dots 150 \text{ kHz}$
- selectivitate: $0; 18; 36; 54 \text{ dB/octavă}$.

Tensiunea u_d a fost vizualizată cu ajutorul unui osciloscop HAMEG-HM 203, 20 MHz (Germania) (fig. 1.23)

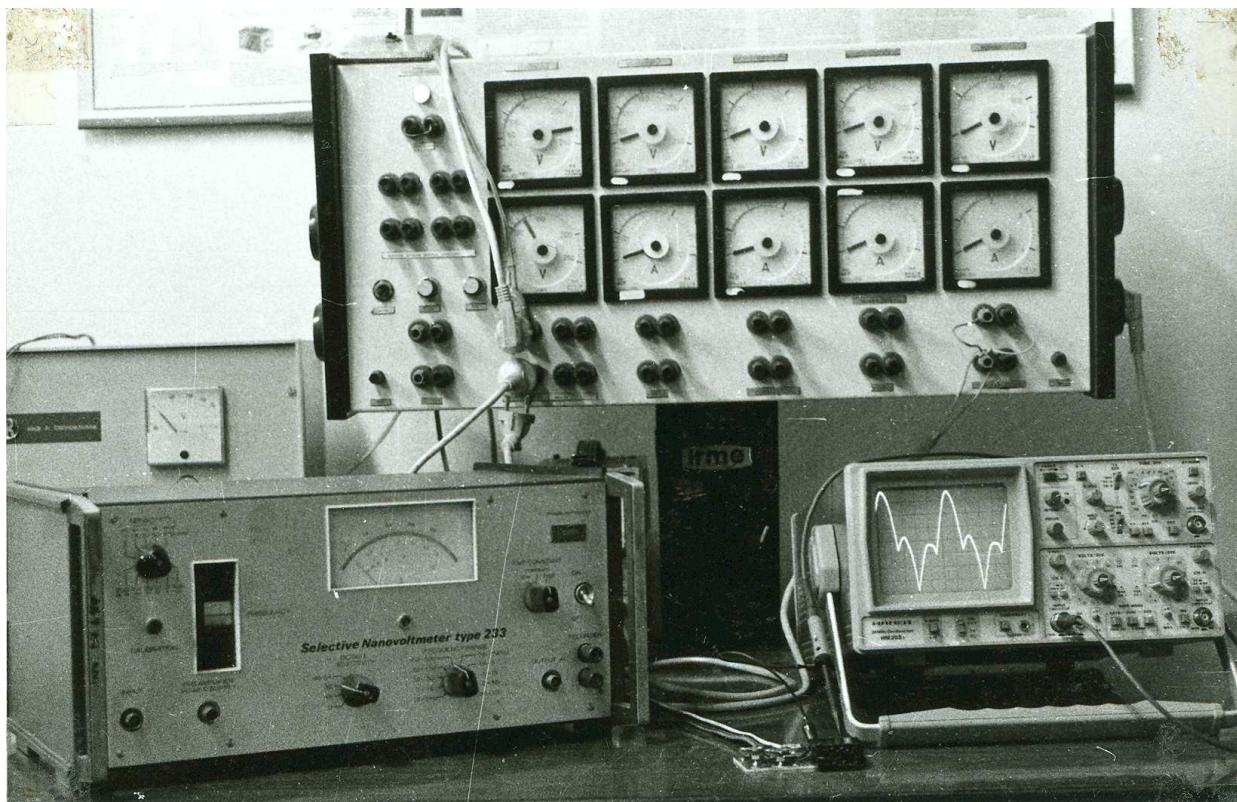


Fig.1.23 Vizualizarea tensiunii u_d și măsurarea armonicilor respective

S-au obținut următoarele date experimentale, pornind de la situația inițială $U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = 24V$ (tabelul 1.2).

Tabelul 1.2

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru u_d	Valori măsurate experimental (V)	Valori obținute prin simulare PSPICE (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a_0	39,3	39,2	0,2
	300	A_3	2,26	2,28	-0,8
	600	A_6	0,480	0,484	-0,8
Sistemul 2 ($u_3 = 0$)	0	a_0	28,1	28	0,3
	100	A_1	13,7	13,75	-0,4
	200	A_2	0,745	0,750	-0,6
Sistemul 3 ($u_3 = 0, u_2 = 0$)	0	a_0	14,9	14,8	0,6
	100	A_1	9,95	10	-0,5
	200	A_2	1,99	2,01	-0,9
	300	A_3	0,81	0,815	-0,6
Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	30,16	30,1	0,2
	100	A_1	20,15	20	0,7
	200	A_2	3,9	3,93	-0,7
	300	A_3	1,67	1,68	-0,6

Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acelea obținute prin simulare **PSPICE** (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea s-a făcut analiza armonică a tensiunii u_d , folosind aparatul RFT-Sichtgerat SG1 (Germania) (fig.3.24). Rezultatele obținute coincid practic cu acelea din tabelul 1.2.

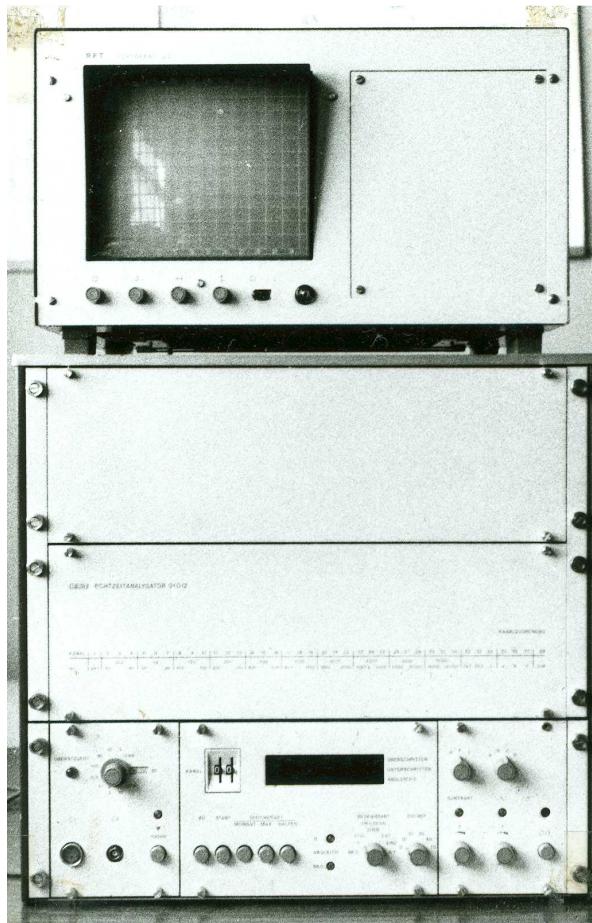


Fig.1.24 Analiza armonică a tensiunii u_d cu aparatul RFT-Sichtgerat SG1

1.2 Puntea de diode alimentând o sarcină complexă

În cele ce urmează se va studia puntea de diode alimentând o sarcină formată dintr-o rezistență R_d , o reactanță inductivă X_d și o sursă de tensiune contraelectromotoare E_d . Sursa de tensiune alternativă trifazată posedă în cele trei faze reactanțele X_a , X_b , X_c . Sistemul de tensiuni electromotoare (e_a , e_b , e_c) este în general nesimetric.

Se vor deduce formele de undă ale mărimilor care intervin la funcționarea punții și se vor calcula armonicele acestor mărimi.

Se va prezenta o metodă analitică obținută prin adaptarea și dezvoltarea unor procedee de calcul din literatura tehnică de specialitate [R3], [R4], [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S8], [W3].

Apoi se va face o modelare și o simulare pe calculator precum și o comparație a rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda analizei pe calculator.

1.2.1 Metoda analitică

Metoda analitică dezvoltată în continuare permite calculul armonicilor de curent pentru o punte trifazată de diode sub condiții de dezechilibru a sursei de alimentare. Expresiile analitice pentru armonicele de curent sunt obținute luând în considerare efectele undei de curent continuu și a

unghiului de comutație. În literatura de specialitate există lucrări care tratează această problemă, dar în diferite ipoteze de lucru [S6].

Astfel, în unele lucrări impedanța pentru partea de curent continuu este considerată infinită, deci curentul continuu este considerat perfect constant (fără efect de undă, deci fără ondulații). În alte lucrări se neglijeză reactanța de comutație (deci unghiul de comutație) sau se consideră puntea ca o sursă de tensiune ideală (impedanța părții de curent alternativ este cu mult mai mică decât impedanța părții de curent continuu).

În metoda analitică prezentată în continuare se iau în considerare efectele undei de curent continuu și ale unghiului de comutație. Impedanța părții de curent alternativ nu este necesar să fie mai mică decât impedanța părții de curent continuu. Ele pot fi comparabile în mărime.

Metoda este foarte precisă, rezultatele obținute fiind foarte apropiate față de acelea obținute prin metoda simulării pe calculator [S6].

1.2.1.1 Expresiile generale pentru armonicele de curent.

În figura 1.25 este reprezentată puntea trifazată analizată.

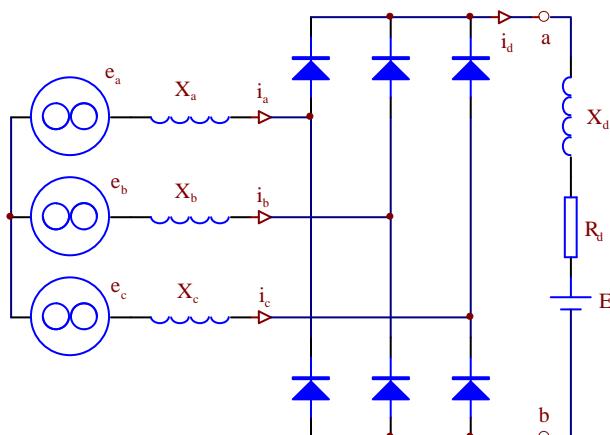


Fig.1.25 Punte de diode alimentată nesimetric, cu o sarcină complexă

Curentul i_d al părții de curent continuu constă în componenta I_d și în componenta alternativă i_{dr} . Expresia generală pentru acest curent va fi deci:

$$i_d = I_d + i_{dr} = I_d + \sum_m i_{dm} = I_d + \sum_m \sqrt{2} I_{dm} \cos(m\chi - \beta_m) \quad (1.77)$$

unde:

m = ordinul armonicii;

I_{dm} = valoarea efectivă a armonicii m ;

β_m = faza inițială pentru armonica m .

Considerând circuitele echivalente pentru componenta de curent continuu și pentru aceea de curent alternativ, le reprezentăm în figura 1.26.

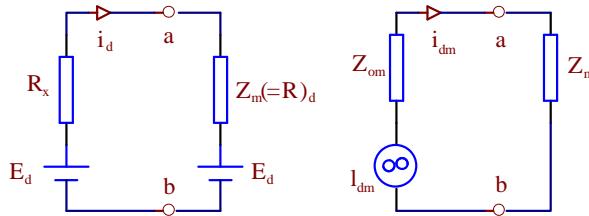


Fig.1.26 Circuite echivalente pentru componenta de curent continuu, respectiv de curent alternativ

Notăm:

E_{do} = tensiunea medie la mers în gol;

R_x = rezistență ipotetică reprezentând tensiunea revenind comutației;

e_{dm} = armonica de ordinul m a t.e.m.;

Z_m = impedanță pentru armonica de ordin m în circuitul de c.c., văzută pe la bornele a și b;

Z_{om} = impedanță pentru armonica de ordin m pentru partea de c.a. văzută pe la bornele a și b;

Evident, în figura 3.26 avem circuite echivalente de tip Thévenin. Armonica m de curent pentru partea de c.c. este dată de relația:

$$\underline{I}_{dm} = \frac{\underline{E}_{dm}}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_{om}} \quad (1.78)$$

Dacă reactanța de filtraj X_d este infinit de mare, bornele a și b în fig. 1.26 sunt conectate cu sarcina de c.c. pentru componenta de c.c. și circuitul este deschis pentru componenta de c.a. (fig.1.27).

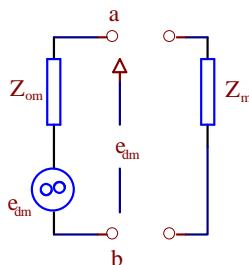


Fig.1.27 Circuitul echivalent pentru componenta de curent alternativ la mers în gol

Deci tensiunea de circuit deschis (t.e.m.) e_{dm} poate fi determinată folosind presupunerea că în zona de c.c. curentul i_d nu are ondulații, adică $i_d = I_d$. De asemenea, cunoscând armonica de curent i_{dm} , valorile lui I_{dm} și β_m din relația (1.77) pot fi cu ușurință obținute.

Curentul de linie de c.a. poate fi analizat pe o cale asemănătoare. Mai precis, curentul de linie i_a (din fază a) constă din curentul i_{oa} care este produs de curentul neted de c.c. egal cu valoarea medie I_d și din curentul Δi_a care este determinat în zona de c.a. de către componenta i_{dr} injectată în circuitul de redresare.

Deci, el are expresia:

$$i_a = i_{oa} + \Delta i_a \quad (1.79)$$

Similar, ecuațiile pentru curenții de linie de c.a. pentru celelalte două faze pot fi scrise în felul următor:

$$i_b = i_{ob} + \Delta i_b \quad (1.80)$$

$$i_c = i_{oc} + \Delta i_c \quad (1.81)$$

Calcularea detaliată a curenților pentru zonele de c.c. și de c.a. este prezentată în continuare.

1.2.1.2 Calcularea armonicilor de curent pentru partea de curent continuu.

Funcțiile de comutație ale redresării și determinarea lui e_{dm}

În paragraful precedent s-a prezentat tensiunea de circuit deschis (t.e.m.) e_{dm} , egală cu armonica componentă a tensiunii de ieșire de c.c. pentru cazul mărimii infinite a reactanței de netezire, adică având curent continuu perfect neted. În acest caz, tensiunea e_d din zona de c.c. se poate exprima cu ajutorul funcțiilor de comutație ale redresării S_a , S_b , S_c , arătate în fig. 1.28.

Avem:

$$e_d = S_a e_a + S_b e_b + S_c e_c \quad (1.82)$$

unde e_a , e_b , e_c sunt tensiunile electromotoare de pe cele trei faze dezechilibrate, date de relațiile:

$$e_a = E_a \sin(x - x_1) \quad (1.83)$$

$$e_b = E_a \sin(x - x_2) \quad (1.84)$$

$$e_c = E_a \sin(x - x_3) \quad (1.85)$$

Fiecare funcție de comutație a redresării poate fi exprimată cu seriile Fourier următoare:

$$S_a = \sum_{m=1,3,5...}^{\infty} A_{an} \cos nx + B_{an} \sin nx \quad (1.86)$$

$$S_b = \sum_{m=1,3,5...}^{\infty} A_{bn} \cos nx + B_{bn} \sin nx \quad (1.87)$$

$$S_c = \sum_{m=1,3,5...}^{\infty} A_{cn} \cos nx + B_{cn} \sin nx \quad (1.88)$$

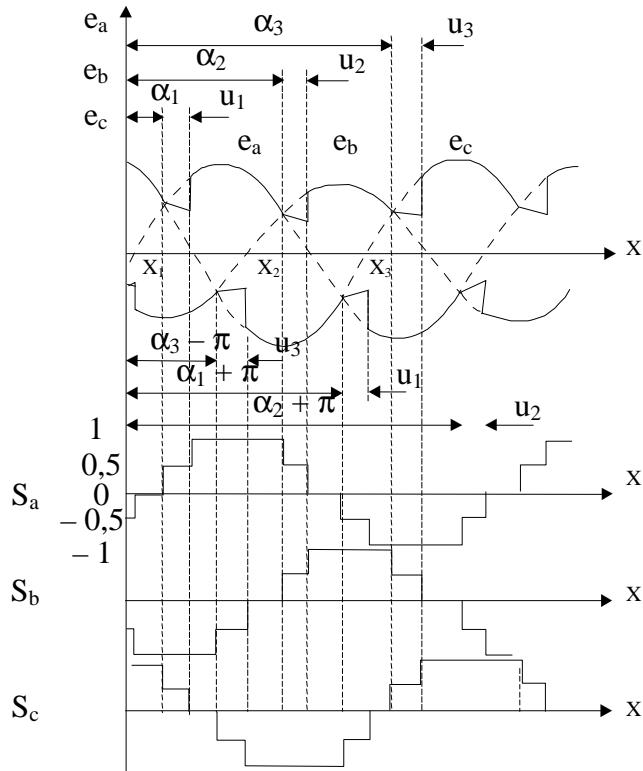


Fig. 1.28 Sistemul nesimetric de alimentare și funcțiile de comutație ale redresării

unde:

$$A_{an} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{n u_1}{2} - \sin n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{n u_2}{2} \right] \quad (1.89)$$

$$B_{an} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{n u_1}{2} - \cos n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{n u_2}{2} \right] \quad (1.90)$$

$$A_{bn} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{n u_2}{2} - \sin n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{n u_3}{2} \right] \quad (1.91)$$

$$B_{bn} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{n u_2}{2} - \cos n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{n u_3}{2} \right] \quad (1.92)$$

$$A_{cn} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{n u_3}{2} - \sin n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{n u_1}{2} \right] \quad (1.93)$$

$$B_{cn} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{n u_3}{2} - \cos n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{n u_1}{2} \right] \quad (1.94)$$

În aceste relații avem:

$$n = 2k - 1; k = 1, 2, 3, \dots$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = unghiurile de aprindere ale fazelor respective de la punctul zero $x = 0$, arătate în

fig. 1.28

u_1, u_2, u_3 = unghiurile de comutație ale fazelor respective, arătate în fig. 3.28.

Sub condiții de dezechilibru (nesimetrie) ale sursei, unghiurile de comutație u_1, u_2, u_3 în fazele a, b, c sunt date de relațiile:

$$u_1 = \arccos \left[1 - \frac{(X_c + X_a) I_d}{\sqrt{E_c^2 + E_a^2 - 2E_c E_a \cos(x_3 - x_1)}} \right] \quad (1.95)$$

$$u_2 = \arccos \left[1 - \frac{(X_a + X_b) I_d}{\sqrt{E_a^2 + E_b^2 - 2E_a E_b \cos(x_1 - x_2)}} \right] \quad (1.96)$$

$$u_3 = \arccos \left[1 - \frac{(X_b + X_c) I_d}{\sqrt{E_b^2 + E_c^2 - 2E_b E_c \cos(x_2 - x_3)}} \right] \quad (1.97)$$

unde:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{-E_c \sin x_3 + E_a \sin x_1}{-E_c \cos x_3 + E_a \cos x_1} \quad (1.98)$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{-E_a \sin x_1 + E_b \sin x_2}{-E_a \cos x_1 + E_b \cos x_2} \quad (1.99)$$

$$\alpha_3 = \operatorname{arctg} \frac{-E_b \sin x_2 + E_c \sin x_3}{-E_b \cos x_2 + E_c \cos x_3} \quad (1.100)$$

Deducerea unghiurilor de comutație este dată la sfârșitul acestui capitol.

Înlocuind ecuațiile 1.83, 1.84, 1.85, și 1.86, 1.87, 1.88 în ecuația 1.82 obținem:

$$e_d = E_{d0} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} A_{dm} \cos mx + B_{dm} \sin mx \quad (1.101)$$

unde:

$$E_{d0} = \frac{1}{2} [E_a (-A_{a1} \sin x_1 + B_{a1} \cos x_1) + E_b (-A_{b1} \sin x_2 + B_{b1} \cos x_2) + E_c (-A_{c1} \sin x_3 + B_{c1} \cos x_3)] \quad (1.102)$$

$$A_{dm} = -\frac{1}{2} \{E_a [(A_{a(m-1)} + A_{a(m+1)}) \sin x_1 + (B_{a(m-1)} - B_{a(m+1)}) \cos x_1] + E_b [(A_{b(m-1)} + A_{b(m+1)}) \sin x_2 + (B_{b(m-1)} - B_{b(m+1)}) \cos x_2] + E_c [(A_{c(m-1)} + A_{c(m+1)}) \sin x_3 + (B_{c(m-1)} - B_{c(m+1)}) \cos x_3]\} \quad (1.103)$$

$$B_{dm} = \frac{1}{2} \{E_a [(A_{a(m-1)} - A_{a(m+1)}) \cos x_1 - (B_{a(m-1)} + B_{a(m+1)}) \sin x_1] + E_b [(A_{b(m-1)} - A_{b(m+1)}) \cos x_2 - (B_{b(m-1)} + B_{b(m+1)}) \sin x_2] + E_c [(A_{c(m-1)} - A_{c(m+1)}) \cos x_3 - (B_{c(m-1)} + B_{c(m+1)}) \sin x_3]\} \quad (1.104)$$

$$m = 2k; k = 1, 2, 3, \dots$$

Primul termen din partea dreaptă a ecuației 1.101 (adică E_{do}) reprezintă componenta continuă a lui e_d iar restul termenilor reprezintă armonicele. Deci, am obținut armonica de ordinul m alui e_{dm} din ecuația 1.78.

1.2.1.3 Impedanțele Z_m și Z_{om}

Impedanța Z_m pentru armonica m , din zona de c.c. văzută pe bornele a și b ale circuitelor de redresare este determinată după fig. 1.25 în felul următor:

$$Z_m = R_d + jm X_d \quad (1.105)$$

În celalătă zonă, impedanța Z_{om} pentru armonica m a părții de c.a. văzută pe la aceleași borne este afectată de perioada de comutație. Luând în considerare unghurile de comutație, impedanța Z_{om} poate fi exprimată aproximativ ca:

$$Z_{om} = jm \left(2 - \frac{u_1 + u_2 + u_3}{2\pi} \right) \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \quad (1.106)$$

Deducerea lui Z_{om} se face la sfârșitul acestui capitol.

1.2.1.4 Armonicile de curent pentru zona de curent continuu

Armonica m de curent pentru zona de c.c. i_{dm} poate fi dedusă din ecuațiile 1.78, 1.101, 1.105, 1.106. Deci, expresia pentru curentul i_d din zona de c.c. poate fi descrisă în felul următor:

$$i_d = I_d + i_{dr} \quad (1.107)$$

$$i_d = I_d + \sum_{m=2,4,6\dots}^{\infty} \sqrt{2} I_{dm} \cos(mx - \beta_m) \quad (1.108)$$

unde:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{(A_{dm}^2 + B_{dm}^2)/2}}{|Z_m + Z_{om}|} \quad (1.109)$$

$$\beta_m = \operatorname{arctg} \frac{B_{dm}}{A_{dm}} + \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(Z_m + Z_{om})}{\operatorname{Re}(Z_m + Z_{om})} \quad (1.110)$$

$$m = 2k; k = 1, 2, 3, \dots$$

1.2.1.5 Calcularea armonicilor de curenț pentru zona de curenț alternativ.

Curenții i_{oa} , i_{ob} , i_{oc}

După cum rezultă din paragraful 1.2.1.1, curenții de linie din zona de c.a. i_{oa} , i_{ob} , i_{oc} sunt produși de curențul constant I_d din partea de c.c. Deci, după ecuațiile 1.95 ... 1.100 și 1.125 curențul alternativ i_{oa} în faza a arătat în fig. 1.29 este reprezentat de o formă simetrică de undă descrisă de:

$$(a) \alpha_1 \leq x < \alpha_1 + u_1$$

$$i_{oa} = \frac{1 - \cos(x - \alpha_1)}{1 - \cos u_1} \cdot I_d \quad (1.111)$$

$$(b) \alpha_1 + u_1 \leq x < \alpha_2$$

$$i_{oa} = I_d \quad (1.112)$$

$$(c) \alpha_2 \leq x < \alpha_2 + u_2$$

$$i_{oa} = \left[1 - \frac{1 - \cos(x - \alpha_2)}{1 - \cos u_2} \right] I_d \quad (1.113)$$

$$(d) \alpha_2 + u_2 \leq x < \alpha_1 + \pi$$

$$i_{oa} = 0 \quad (1.114)$$

De aici, seria Fourier a curențului i_{oa} este exprimată prin

$$i_{oa} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (A_{oan} \cos nx + B_{oan} \sin nx) \quad (1.115)$$

unde A_{oan} și B_{oan} sunt date la sfârșitul capitolului.

Expresiile lui i_{ob} și i_{oc} pentru fazele b și c pot fi obținute schimbând notațiile în ecuația 1.115 în felul următor:

Faza b:

- b în loc de a
- a în loc de c
- 2 în loc de 1
- 1 în loc de 3

Faza c:

- c în loc de a
- b în loc de c
- 3 în loc de 1
- 2 în loc de 3

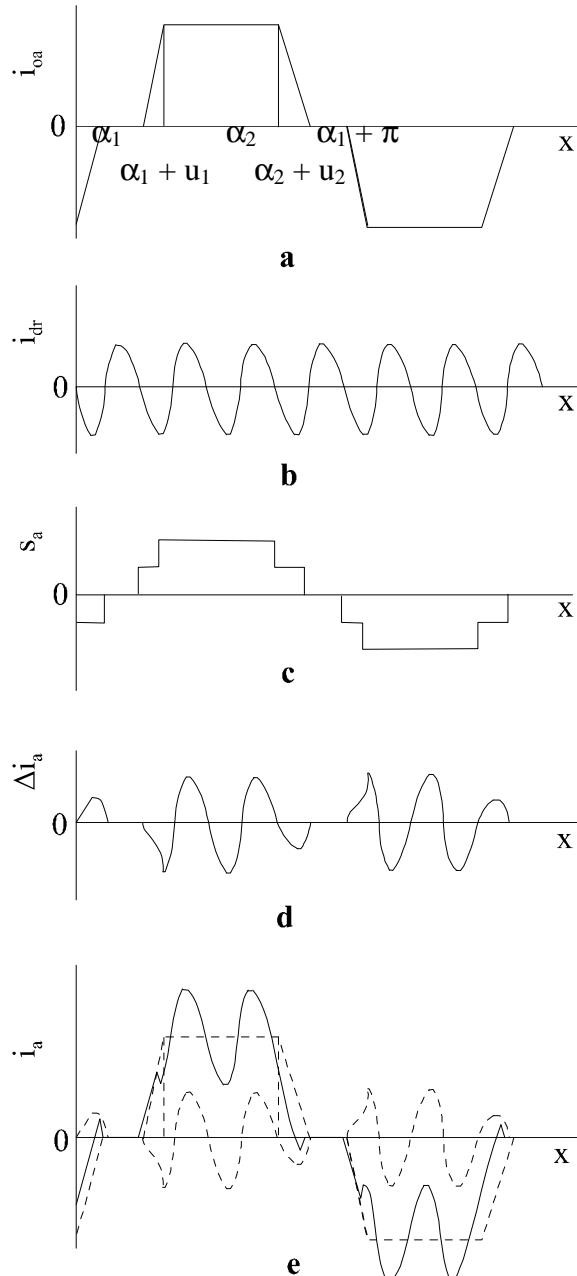


Fig. 1.29 Formele de undă ale curenților alternativi

1. 2. 1. 6. Armonicele de curent pentru partea de curent alternativ

Formele de undă ale curenților de linie pe partea de curent alternativ sunt redate în figura 1.29.

Analizând figurile 1.29 b la 1.29 d se poate concluziona că curentul Δi_a care este determinat în fază a de componenta de c.a. i_{dr} a părții de c.c., poate fi obținut prin multiplicarea curentului i_{dr} cu funcția de comutație a redresării S_a .

$$\Delta i_a = S_a i_{dr} \quad (1.116)$$

$$\Delta i_a = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \Delta A_{an} \cos nx + \Delta B_{an} \sin nx \quad (1.117)$$

unde:

$$\Delta A_{an} = \sum_{m=2,4,6...}^{\infty} I_{dm} \frac{1}{\sqrt{2}} [(A_{a(n-m)} + A_{a(n+m)}) \cdot \cos \beta_m - (B_{a(n-m)} + B_{a(n+m)}) \cdot \sin \beta_m] \quad (1.118)$$

$$\Delta B_{an} = \sum_{m=2,4,6...}^{\infty} I_{dm} \frac{1}{\sqrt{2}} [(A_{a(n-m)} + A_{a(n+m)}) \cdot \cos \beta_m + (B_{a(n-m)} + B_{a(n+m)}) \cdot \sin \beta_m] \quad (1.119)$$

$$n = 2k - 1; k = 1, 2, 3, \dots$$

$$m = 2k; \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Aici trebuie notat:

$$A_{a(n-m)} = A_{a(m-n)} \quad \text{și} \quad (1.120)$$

$$B_{a(n-m)} = -B_{a(m-n)} \quad (1.121)$$

pentru $n - m < 0$.

Prin urmare curentul de linie i_a arătat în figura 1.29 este dedus din ecuațiile 1.79, 1.115, și 1.117 după cum urmează:

$$i_a = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} [(A_{oan} + \Delta A_{an}) \cos nx + (B_{oan} + \Delta B_{an}) \sin nx] \quad (1.122)$$

$$i_a = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} [A_{ian} \cos nx + B_{ian} \sin nx] \quad (1.123)$$

Valoarea efectivă I_{an} a armonicii n alui i_a este:

$$I_{an} = \frac{\sqrt{A_{ian}^2 + B_{ian}^2}}{2}$$

Expresiile pentru i_b și i_c rezultă ușor prin reamplasarea indicilor după cum s-a arătat mai înainte.

1.2.1.7 Deducerea unghiurilor de comutare

Când curentul este transferat din faza c la faza a, curentul de comutare i în faza a poate fi exprimat în felul următor:

$$i = \frac{1}{X_c + X_a} \int_{\alpha_i}^x (e_a - e_c) dx \quad (1.124)$$

$$i = \frac{1}{X_c + X_a} \sqrt{E_c^2 + E_a^2 - 2E_c E_a \cos(x_3 - x_1)} \cdot [1 - \cos(x - \alpha_1)] \quad (1.125)$$

unde α_1 este dat de ecuația 1.98.

Unghiul de comutație u_1 în faza a rezultă din condiția $i = I_d$ la $x = \alpha_1 + u_1$ în ecuația 1.125 și este dat de relația 1.95.

Unghiul de comutație u_2 și u_3 în fazele b și c sunt obținute în același mod.

1.2.1.8 Deducerea lui Z_{om}

Este dificil a obține exact impedanța Z_{om} a părții de c.a. văzută pe la bornele a și b în figura 1.25. Se prezintă aici o soluție aproximativă.

Pentru că reactanța de comutare nu diferă foarte mult în fiecare fază, considerăm efectul fiecărei reactanțe de comutare în medie pentru determinarea lui Z_{om} .

Astfel, reactanța medie de comutare pentru o fază este dată de:

$$X_e = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \quad (1.126)$$

Utilizând reactanța medie de comutare, reactanța X_t a părții de c.a. văzută pe la bornele de ieșire a și b este dată de $\frac{3}{2} X_e$ pentru perioada de comutație și de $2X_e$ pentru restul perioadei.

Deci, valoarea medie a lui X_t pe o jumătate de ciclu (π radiani) are expresia următoare:

$$\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_1 + \pi} X_t dx = \left(2 - \frac{u_1 + u_2 + u_3}{2\pi} \right) X_e = \left(2 - \frac{u_1 + u_2 + u_3}{2} \right) \cdot \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \quad (1.127)$$

Exprimând ecuația 1.127 în termenii unei impedanțe pentru armonica m, găsim ecuația 1.106.

1.2.1.9 Deducerea coeficienților Fourier ai ecuației (1.115)

Coefficienții Fourier A_{oan} și B_{oan} sunt următorii:

$$\begin{aligned}
A_{oan} = & \frac{2I_d}{n\pi} [-\sin n(\alpha_1 + u_1) + \sin n(\alpha_2 + u_2)] + \\
& + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_d}{1 - \cos u_1} \cdot \left\{ \frac{2}{n} \sin \frac{n u_1}{2} \cos n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) - \right. \\
& - \frac{1}{n+1} \sin \frac{(n+1)u_1}{2} \cdot \cos \left[(n+1) \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) - \alpha_1 \right] - \\
& - \frac{1}{n-1} \sin \frac{(n-1)u_1}{2} \cdot \cos \left[(n-1) \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) + \alpha_1 \right] \left. \right\} + \\
& + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_d}{1 - \cos u_2} \cdot \left\{ -\frac{2}{n} \sin \frac{n u_2}{2} \cos n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) - \right. \\
& - \frac{1}{n+1} \sin \frac{(n+1)u_2}{2} \cdot \cos \left[(n+1) \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) - \alpha_2 \right] - \\
& - \frac{1}{n-1} \sin \frac{(n-1)u_2}{2} \cdot \cos \left[(n-1) \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) + \alpha_2 \right] \left. \right\}
\end{aligned} \tag{1.128}$$

$$\begin{aligned}
B_{oan} = & \frac{2I_d}{n\pi} [\cos n(\alpha_1 + u_1) - \cos n(\alpha_2 + u_2)] + \\
& + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_d}{1 - \cos u_1} \cdot \left\{ \frac{2}{n} \sin \frac{n u_1}{2} \sin n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) - \right. \\
& - \frac{1}{n+1} \sin \frac{(n+1)u_1}{2} \cdot \sin \left[(n+1) \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) - \alpha_1 \right] - \\
& - \frac{1}{n-1} \sin \frac{(n-1)u_1}{2} \cdot \sin \left[(n-1) \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) + \alpha_1 \right] \left. \right\} + \\
& + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_d}{1 - \cos u_2} \cdot \left\{ -\frac{2}{n} \sin \frac{n u_2}{2} \sin \left[n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \right] + \right. \\
& + \frac{1}{n+1} \cdot \sin \frac{(n+1)u_2}{2} \sin \left[(n+1) \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) - \alpha_2 \right] + \\
& + \frac{1}{n-1} \sin \frac{(n-1)u_2}{2} \sin \left[(n-1) \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) + \alpha_2 \right] \left. \right\}
\end{aligned} \tag{1.129}$$

1.2.2 Metoda simulării pe calculator

S-a realizat modelarea PSPICE a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având o sarcină complexă formată dintr-o rezistență, o inductanță și o tensiune contraelectromotoare.

În figura 1.30 este prezentată schema electrică a unei punți trifazate de diode, a sursei, a sarcinii, cu numerotarea corespunzătoare a nodurilor.

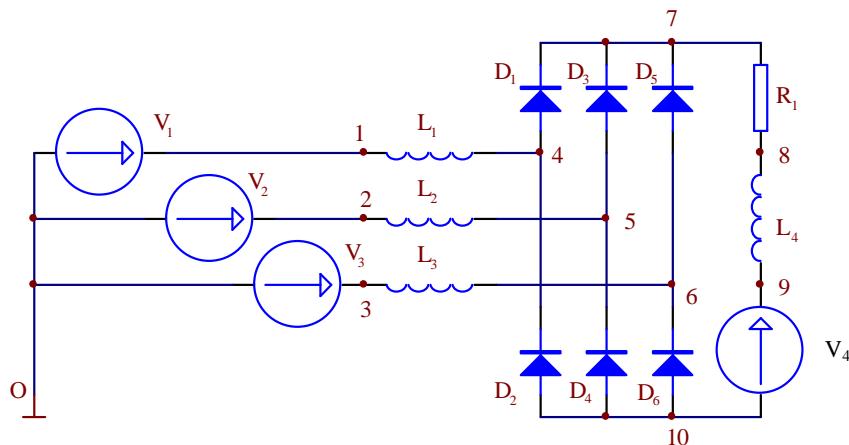


Fig. 1.30 Puntea de diode cu sarcină complexă, pentru modelarea PSPICE

Folosind modelul prezentat mai sus, s-a făcut analiza **PSPICE** pentru mai multe cazuri, modelul de lucru fiind asemănător cu cel descris la paragraful 1.1.3.

Interesează în mod deosebit analiza Fourier a curenților i_d , i_a , i_b , i_c . Rezultatele obținute în urma analizei cu programul **PSPICE** concordă cu rezultatele obținute prin metoda analitică prezentată anterior. În continuare, vom prezenta comparativ aceste rezultate.

1.2.3.Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator

S-au analizat prin ambele metode patru cazuri particulare (I – sistemul simetric , II , III , IV – sisteme nesimetrice). Aceste cazuri particulare, respectiv parametrii de circuit sunt redate în tabelul : 1.3., cu notațiile din figura 1.30 (modelare **PSPICE**).

Tabelul 1.3

Parametrii de circuit	Sistem simetric I	Sistem nesimetric II	Sistem nesimetric III	Sistem nesimetric IV
$E_a(V_1)$ (val. max.)	100 V	100	100	100
$E_b(V_2)$ (val. max.)	100 V	95	100	95
$E_c(V_3)$ (val. max.)	100 V	90	100	90
x_1	0^0	0^0	0^0	0^0
x_2	120^0	120^0	117^0	117^0
x_3	240^0	240^0	243^0	243^0
$X_a(X_1)$	10Ω	10	10	10
$X_b(X_2)$	10Ω	10	10	11
$X_c(X_3)$	10Ω	10	10	9
L_1	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,03184
L_2	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,03503
L_3	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,02866
$X_d(X_4)$	5Ω	5	1	5
L_4	0,01592 H	0,01592	0,01592	0,01592
$R_d(R_1)$	10Ω	10	10	10
$E_d(V_4)$	145 V	145	145	145

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele : 1.4. , 1.5. , 1.6. , 1.7. .

Tabelul 1.4

Sistem simetric I	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d $(I(R_1))$	0	I_d	0,9161	0,9101	0,7
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	-	-	-
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	-	-	-
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0975	0,0965	1
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	-	-	-
i_a $(I(V_1))$	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0731	0,0714	2,3
i_b $(I(V_2))$	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0731	0,0714	2,3
i_c $(I(V_3))$	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0731	0,0714	2,3

Tabelul 1.5

Sistem nesimetric II	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,5109	0,5084	0,5
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,1060	0,1065	- 0,5
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0197	0,0195	1
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0810	0,0815	0,6
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,0112	0,0111	0,9
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,6362	0,6282	1,2
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0250	0,0254	-1,5
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,1261	0,1238	1,8
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0481	0,0469	2,6
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	0,5455	0,5333	2,2
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0741	0,0732	1,2
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1469	0,1432	2,6
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0357	0,0362	-1,4
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	0,5261	0,5240	0,4
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0621	0,0629	-1,2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,1351	0,1330	1,5
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0252	0,0246	2,4

Tabelul 1.6

Sistem nesimetric III	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,9136	0,9086	0,6
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,1230	0,1223	0,6
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0242	0,0244	-0,8
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0931	0,0921	1,1
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,0117	0,0116	0,8
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,9236	0,9145	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0289	0,0286	1
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,2151	0,2177	-1,1
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0525	0,0519	1,1
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	1,0776	1,0670	1
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0608	0,0598	1,6
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1902	0,1865	2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0825	0,0805	2,5
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	1,0241	1,0140	1
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0852	0,0867	-1,7
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,2073	0,2035	1,8
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0702	0,0684	2,6

Tabelul 1.7

Sistem nesimetric IV	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,5028	0,4998	0,6
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,0483	0,0486	- 0,6
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0685	0,0068	0,7
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0850	0,0842	0,9
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,00425	0,0043	-1,1
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,5749	0,5687	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0310	0,0304	1,9
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,1250	0,1264	-1,1
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0413	0,0403	2,5
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	0,5740	0,5667	1,3
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0302	0,0295	2,3
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1293	0,1323	-2,2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0423	0,0412	2,6
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	0,5280	0,5177	2
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0093	0,0091	2,2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,1419	0,1423	-0,3
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0343	0,0335	2,4

După cum se observă din tabelele 1.4 , 1.5 , 1.6 , 1.7 , rezultatele obținute prin metoda analitică prezentată și prin metoda simulării pe calculator (**PSPICE**) sunt apropiate , eroarea relativă nedepășind 1,1 % pentru armonicele de curent ale părții de curent continuu și respectiv 2,6% pentru armonicele de curent ale părții de curent alternativ . Erorile care apar se datorează în bună măsură faptului că impedanța Z_{0m} nu poate fi calculată decât aproximativ .

În concluzie, rezultatele obținute confirmă valabilitatea metodei analitice propuse pentru puntea trifazată de diode cu alimentare nesimetrică și având o sarcină complexă formată dintr-o rezistență , o inductivitate și o tensiune contraelectromotoare .

1.3. Introducerea unui coeficient global de nesimetrie (CGN)

Din cele prezentate în subcapitolul 1.1 privind puntea de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni, rezultă că oricărui sistem nesimetric îi corespunde în mod univoc o tensiune u_d și deci o serie Fourier atașată. La modificarea nesimetriei sistemului trifazat îi va corespunde o modificare corespunzătoare a seriei de armonici. Prin urmare, la modificarea nesimetriei sistemului trifazat (u_1, u_2, u_3) se va modifica spectrul de armonici al tensiunii u_d .

În acest fel, putem caracteriza un sistem trifazat nesimetric prin coeficienții a_n, b_n, a_0, a_i seriei Fourier a tensiunii u_d obținută prin redresarea sistemului (u_1, u_2, u_3) cu o punte trifazată de diode [P19].

1.3.1. Punerea problemei

În paragraful 1.1.1.2. am văzut că tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) nu are armonică corespunzătoare lui $n = 1$ (deci de pulsație 2ω și frecvență $2f$) și de asemenea pentru $n = 2$ (deci de pulsație 4ω și frecvență $4f$).

Pe de altă parte, tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat accentuat nesimetric cum este cel de la paragraful 1.1.1.7 (funcționare monofazată) conține o armonică importantă corespunzătoare lui $n = 1$ dar și una corespunzătoare lui $n = 2$.

Deoarece intuitiv este clar că la creșterea nesimetriei sistemului (u_1, u_2, u_3) trebuie să crească amplitudinea armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ din tensiunea u_d , vom defini în continuare un coeficient global de nesimetrie (**CGN**). Acesta va ține seama concomitent de nesimetria de module și de nesimetria de faze .

Putem considera $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} , numere pozitive subunitare. Altfel spus, pentru orice sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) putem considera un sistem trifazat "asemenea" cu cel dat, la care $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} sunt numere pozitive subunitare iar fazele inițiale sunt aceleasi cu ale sistemului inițial.

Definim coeficientul global de simetrie ca suma amplitudinilor armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ pentru tensiunea u_d atașată sistemului trifazat "asemenea" având $U_{m1} = 1$ [P19].

Deoarece armonica corespunzătoare lui n are amplitudinea:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.130)$$

rezultă că armonicele corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ vor avea amplitudinile:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (1.131)$$

$$A_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (1.132)$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \frac{A_1 + A_2}{U_{m1}} \quad (1.133)$$

Punând $U_{m1} = 1$, putem scrie:

$$k_n = A_1 + A_2 \quad (1.134)$$

Deoarece în această definiție se ia în considerare și armonica de ordinul 2, putem nota pentru claritate $k_n = k_{n2}$. Inițial am considerat un coeficient de nesimetrie care lua în considerare numai armonicele de ordinul 1 [P19] și care avea definiția:

$$k_{n1} = \frac{A_1}{U_{m1}} \quad (1.135)$$

În urma cercetărilor efectuate am ajuns la concluzia că se poate face o caracterizare mai cuprinzătoare a nesimetriei unui sistem trifazat cu ajutorul coeficientului global de nesimetrie de ordinul 2 ($k_n = k_{n2}$). Din acest motiv, în cele ce urmează se va studia acest coeficient.

Se pot imagina și alți coeficienți de nesimetrie, cum este $k_n = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2}$, care va fi studiat într-o lucrare viitoare.

1.3.2. Analiza generală pe cazuri

Vom analiza cele patru cazuri, prezentând formulele de calcul pentru a_1, b_1, a_2, b_2 , care intervin în definiția coeficientului global de nesimetrie.

Cazul 1

Este vorba de cazul (a, b, c).

Prin particularizarea formulelor generale (3.8) și (3.9), obținem:

$$\begin{aligned}
 3\pi a_1 &= -U_{m1} [3 \cos(b + x_1) - \cos(3b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \cos(c + x_1) - \cos(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m2} [3 \cos(a + x_2) - \cos(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(c + x_2) - \cos(3c - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(a + x_3) - \cos(3a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(b + x_3) - \cos(3b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.136}$$

$$\begin{aligned}
 3\pi b_1 &= -U_{m1} [3 \sin(b + x_1) - \sin(3b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \sin(c + x_1) - \sin(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m2} [3 \sin(a + x_2) - \sin(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(c + x_2) - \sin(3c - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(a + x_3) - \sin(3a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(b + x_3) - \sin(3b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.137}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi a_2 &= -U_{m1} [5 \cos(3b + x_1) - 3\cos(5b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \cos(3c + x_1) - 3\cos(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m2} [5 \cos(3a + x_2) - 3\cos(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3c + x_2) - 3\cos(5c - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3a + x_3) - 3\cos(5a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3b + x_3) - 3\cos(5b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.138}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi b_2 &= -U_{m1} [5 \sin(3b + x_1) - 3\sin(5b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \sin(3c + x_1) - 3\sin(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m2} [5 \sin(3a + x_2) - 3\sin(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3c + x_2) - 3\sin(5c - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3a + x_3) - 3\sin(5a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3b + x_3) - 3\sin(5b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.139}$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{1.140}$$

Cazul 2

Este vorba de cazul (a, c, b).

Prin particularizarea formulelor generale (1.13) și (1.14), obținem:

$$\begin{aligned}
 3\pi a_1 &= -U_{m1} [3 \cos(c + x_1) - \cos(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \cos(b + x_1) - \cos(3b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(a + x_2) - \cos(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(c + x_2) - \cos(3c - x_2)] \\
 &= -U_{m3} [3 \cos(a + x_3) - \cos(3a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(b + x_3) - \cos(3b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.141}$$

$$\begin{aligned}
 3\pi b_1 &= -U_{m1} [3 \sin(c + x_1) - \sin(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \sin(b + x_1) - \sin(3b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(a + x_2) - \sin(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(c + x_2) - \sin(3c - x_2)] \\
 &= -U_{m3} [3 \sin(a + x_3) - \sin(3a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(b + x_3) - \sin(3b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.142}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi a_2 &= -U_{m1} [5 \cos(3c + x_1) - 3\cos(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \cos(3b + x_1) - 3\cos(5b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3a + x_2) - 3\cos(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3c + x_2) - 3\cos(5c - x_2)] \\
 &= -U_{m3} [5 \cos(3a + x_3) - 3\cos(5a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3b + x_3) - 3\cos(5b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.143}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi b_2 &= -U_{m1} [5 \sin(3c + x_1) - 3\sin(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \sin(3b + x_1) - 3\sin(5b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3a + x_2) - 3\sin(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3c + x_2) - 3\sin(5c - x_2)] \\
 &= -U_{m3} [5 \sin(3a + x_3) - 3\sin(5a - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3b + x_3) - 3\sin(5b - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.144}$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{1.145}$$

Cazul 3

Este vorba de cazul (b, c, a).

Prin particularizarea formulelor generale (3.18) și (3.19), obținem:

$$\begin{aligned}
 3\pi a_1 &= -U_{m1} [3 \cos(c + x_1) - \cos(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \cos(b + x_1) - \cos(3b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(c + x_2) - \cos(3c - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(a + x_2) - \cos(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(b + x_3) - \cos(3b - x_3)] \\
 &= -U_{m3} [3 \cos(a + x_3) - \cos(3a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.146}$$

$$\begin{aligned}
 3\pi b_1 &= -U_{m1} [3 \sin(c + x_1) - \sin(3c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \sin(b + x_1) - \sin(3b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(c + x_2) - \sin(3c - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(a + x_2) - \sin(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(b + x_3) - \sin(3b - x_3)] \\
 &= -U_{m3} [3 \sin(a + x_3) - \sin(3a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.147}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi a_2 &= -U_{m1} [5 \cos(3c + x_1) - 3\cos(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \cos(3b + x_1) - 3\cos(5b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3c + x_2) - 3\cos(5c - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3a + x_2) - 3\cos(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3b + x_3) - 3\cos(5b - x_3)] \\
 &= -U_{m3} [5 \cos(3a + x_3) - 3\cos(5a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.148}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi b_2 &= -U_{m1} [5 \sin(3c + x_1) - 3\sin(5c - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \sin(3b + x_1) - 3\sin(5b - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3c + x_2) - 3\sin(5c - x_2)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3a + x_2) - 3\sin(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3b + x_3) - 3\sin(5b - x_3)] \\
 &= -U_{m3} [5 \sin(3a + x_3) - 3\sin(5a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.149}$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{1.150}$$

Cazul 4

Este vorba de cazul (c, b, a).

Prin particularizarea formulelor generale (3.23) și (3.24), obținem:

$$\begin{aligned}
 3\pi a_1 &= -U_{m1} [3 \cos(b + x_1) - \cos(3b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \cos(c + x_1) - \cos(3c - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \cos(c + x_2) - \cos(3c - x_2)] \\
 &= -U_{m2} [3 \cos(a + x_2) - \cos(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(b + x_3) - \cos(3b - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \cos(a + x_3) - \cos(3a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.151}$$

$$\begin{aligned}
 3\pi b_1 &= -U_{m1} [3 \sin(b + x_1) - \sin(3b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [3 \sin(c + x_1) - \sin(3c - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [3 \sin(c + x_2) - \sin(3c - x_2)] \\
 &= -U_{m2} [3 \sin(a + x_2) - \sin(3a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(b + x_3) - \sin(3b - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [3 \sin(a + x_3) - \sin(3a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.152}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi a_2 &= -U_{m1} [5 \cos(3b + x_1) - 3\cos(5b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \cos(3c + x_1) - 3\cos(5c - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \cos(3c + x_2) - 3\cos(5c - x_2)] \\
 &= -U_{m2} [5 \cos(3a + x_2) - 3\cos(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3b + x_3) - 3\cos(5b - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \cos(3a + x_3) - 3\cos(5a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.153}$$

$$\begin{aligned}
 15\pi b_2 &= -U_{m1} [5 \sin(3b + x_1) - 3\sin(5b - x_1)] \\
 &= -U_{m1} [5 \sin(3c + x_1) - 3\sin(5c - x_1)] \\
 &= +U_{m2} [5 \sin(3c + x_2) - 3\sin(5c - x_2)] \\
 &= -U_{m2} [5 \sin(3a + x_2) - 3\sin(5a - x_2)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3b + x_3) - 3\sin(5b - x_3)] \\
 &= +U_{m3} [5 \sin(3a + x_3) - 3\sin(5a - x_3)]
 \end{aligned} \tag{1.154}$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{1.155}$$

1.3.3. Analiza unor cazuri particulare

În cazul sistemului trifazat simetric (paragraful 1.1.1.2) coeficientul global de nesimetrie este nul:

$$k_n = 0 \quad (1.156)$$

În cazul $u_3 = 0$ (paragraful 1.1.1.5), coeficientul global de nesimetrie rezultă:

$$k_n = \frac{8+12\sqrt{3}}{15\pi} \approx 0,611 \quad (1.157)$$

În cazul $u_3 = 0$ și $u_2 = 0$ (paragraful 1.1.1.6), coeficientul global de nesimetrie rezultă:

$$k_n = \frac{24}{15\pi} \approx 0,509 \quad (1.158)$$

În cazul $u_3 = 0$ și $u_2 = -u_1$ de funcționare monofazată (paragraful 1.1.1.7), coeficientul global de nesimetrie rezultă:

$$k_n = \frac{48}{15\pi} \approx 1,018 \quad (1.159)$$

1.3.4. Cazul sistemelor de secvență inversă

Având în vedere cele arătate în paragraful 1.1.1.8 rezultă că pentru orice sistem nesimetric de secvență inversă, coeficientul global de nesimetrie este egal cu cel al sistemului pereche de secvență directă [P19].

1.3.5. Program de calculator pentru analiza sistemelor trifazate nesimetrice. (SISNES)

S-a realizat programul de calculator **SISNES** care are trei subprograme:

1. Program pentru calculul coeficientul global de nesimetrie (**CGN**).
2. Program pentru determinarea coeficientul global de nesimetrie maxim (**MAXIK**)
3. Program pentru analiza claselor de dezechilibru ale receptoarelor dezechilibrate discrete (**RDD**)

Programul pentru calculul coeficientului global de nesimetrie (**CGN**) permite calculul acestui coeficient pentru orice sistem trifazat de secvență directă. Sistemul este definit prin

introducerea de la tastatură a parametrilor $U_{m1} = 1$, U_{m2} , U_{m3} (subunitari), $x_1 = 0$, x_2 , x_3 ($x_2 < x_3$). Acest subprogram ne furnizează pe lângă valoarea coeficientului global de nesimetrie $k_n = A_1 + A_2$ și lista amplitudinilor primelor 10 armonici ale lui u_d , gradul de asimetrie, gradul de disimetrie și reprezentarea grafică a spectrului de armonici.

Programul pentru determinarea coeficientul global de nesimetrie maxim (**MAXIK**) permite găsirea sistemului trifazat având k_n maxim.

În acest scop se analizează toate sistemele trifazate obținute prin parcurgerea rețelelor de discretizare pentru U_{m2} , U_{m3} , x_2 , x_3 , redată în figura 1.31:

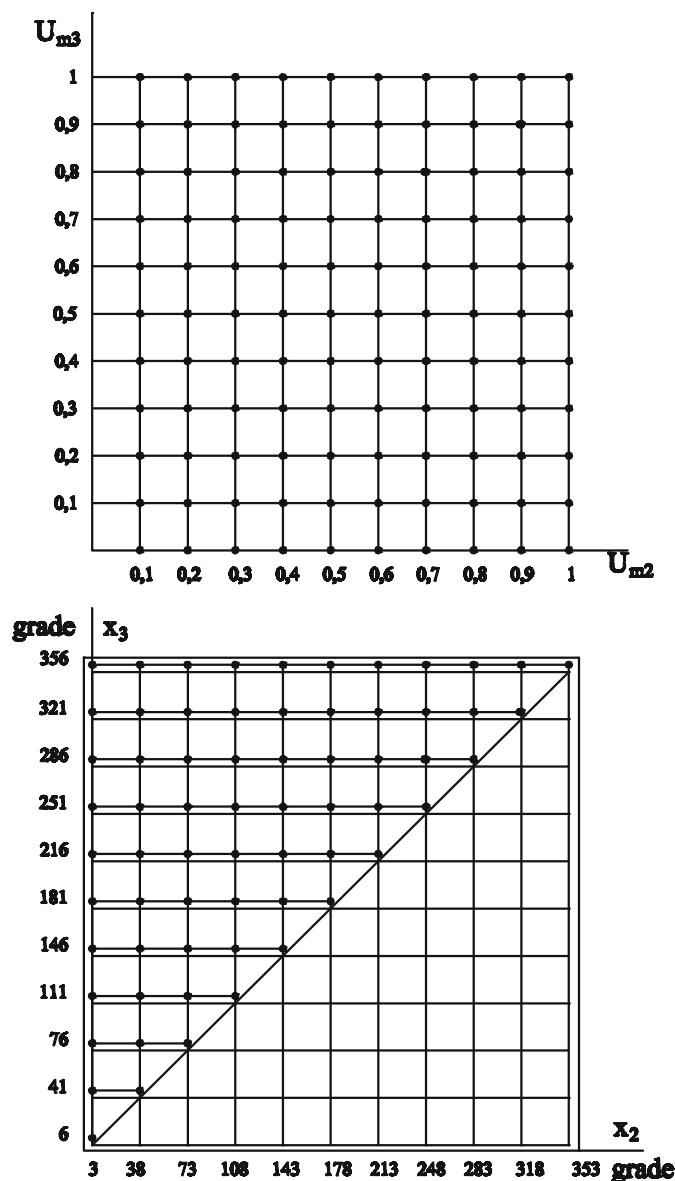


Fig. 1.31 Rețele de discretizare pentru U_{m2} , U_{m3} , x_2 , x_3 .

Se calculează de fiecare dată coeficientul global de nesimetrie și în final se indică valoarea maximă. Programul dă posibilitatea alegerii locului de afișare a rezultatelor: pe ecran sau într-un fișier text (date txt). Acest fișier conține lista tuturor sistemelor analizate, cu valoarea coeficientului global de nesimetrie, iar în final se indică k_n maxim.

Rulând programul **MAXIK** s-a obținut coeficientul global de nesimetrie maxim dintr-un număr de 6600 de sisteme simetrice analizate. Anume, $k_{n \max} = 1,018333$ și se obține pentru sistemul definit de $U_{m1} = 1; U_{m2} = 0,1; U_{m3} = 1; x_1 = 0; x_2 = 178^0; x_3 = 181^0$.

Programul **MAXIK** crează de asemenea încă două fișiere text: verifmax.txt și verifmin.txt (în directorul rădăcină al hard-disk-ului). Acestea au rol de verificare al rezultatelor. În fișierul verifmax sunt date sistemele care au $k_n > 1,01$ iar în fișierul verifmin sunt date sistemele care au $k_n < 0,02$.

Al treilea subprogram al programului **SISNES** permite utilizarea programului **RDD** prin intermediul programului **SISNES**.

Programul **SISNES** afișează la început un meniu central, cu patru posibilități de selecție:

Selecție 1: Programul **CGN**

Selecție 2: Programul **MAXIK**

Selecție 3: Programul **RDD**

Selecție 4: Ieșire (Exit)

Listingul programului de calculator **SISNES** este dat în anexele lucrării.

1.3.6 Program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (VARK)

S-a realizat programul de calculator **VARK** care permite reprezentarea grafică 3D a variației coeficientului global de nesimetrie.

Coefficientul global de nesimetrie este o funcție (continuă) de patru parametri: U_{m2}, U_{m3}, x_2, x_3 (deoarece luăm întotdeauna $U_{m1} = 1, x_1 = 0$). Se pot realiza reprezentări grafice ale variației lui $k_n = k_{n2}$ funcție de 2 parametri, ceilalți 2 fiind menținuți constanți.

Programul **VARK** oferă următoarele posibilități de reprezentare:

1. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, U_{m3})$
2. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_2)$
3. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_3)$

4. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_2)$
5. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_3)$
6. Grafic $k_{n2} = f(x_2, x_3)$
7. Ieșire.

Pentru fiecare posibilitate, se pot realiza trei tipuri de reprezentări grafice:

1. Cu bare.
2. Suprafață.
3. Mixt.

De asemenea, la fiecare reprezenare se indică coeficientul global de nesimetrie maxim și sistemul nesimetric pentru care se obține. În grafic, acest maxim este indicat printr-o bară îngroșată.

Programul **VARK** lucrează în felul următor:

1. Se introduce un sistem trifazat nesimetric prin parametrii U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , x_1 , x_2 , x_3 .
2. Se realizează analiza armonică a tensiunii u_d corespunzătoare.
3. Se alege una din cele şase variante de reprezentare 3D.

În acest moment, programul menține constanți cei doi parametrii care nu variază în timpul reprezentării alese. Mai exact, valorile acestor parametrii sunt “moșteniți” de la introducere (vezi punctul 1 de mai sus). Cei doi parametrii variabili variază în conformitate cu rețelele de discretizare din figura 3.31. Programul calculează de fiecare fată valoarea coeficientului global de nesimetrie k_{n2} și apoi realizează reprezentarea grafică 3D a variației lui k_{n2} funcție de parametrii variabili specifici variantei de reprezentare alese.

Aplicația Vark 1 lucrează după rețelele de discretizare din figura 3.31, deci realizează o diviziune a intervalului de variație maxim pentru x_2 și x_3 în $n = 11$ puncte. Aplicația Vark 2 permite o discretizare mai fină (corespunzătoare la $n = 11 \dots 15$, la alegere).

De asemenea, am realizat rularea programului **VARK** în mediul **MATLAB**. Datele obținute în programul **VARK** sunt transformate în fișiere ASCII care sunt prelucrate în mediul **MATLAB** pentru realizarea unor reprezentări grafice 3D cu parametri îmbunătățiți. Mediul **MATLAB** permite scalarea automată a axelor și modificarea punctului de vedere asupra suprafeței, ceea ce conduce la reprezentări 3D de calitate superioară. De asemenea se pot realiza reprezentări de forma “mesh” (suprafață-rețea) sau “surf” (suprafață plină). Suprafețele obținute sunt color, cu indicarea prin modificarea culorilor a variației lui k_{n2} .

În continuare sunt redate o serie de reprezentări grafice 3D ale variației coeficientului global de nesimetrie, realizate cu programul **VARK**, respectiv cu programul **VARK** rulat în mediul **MATLAB**.

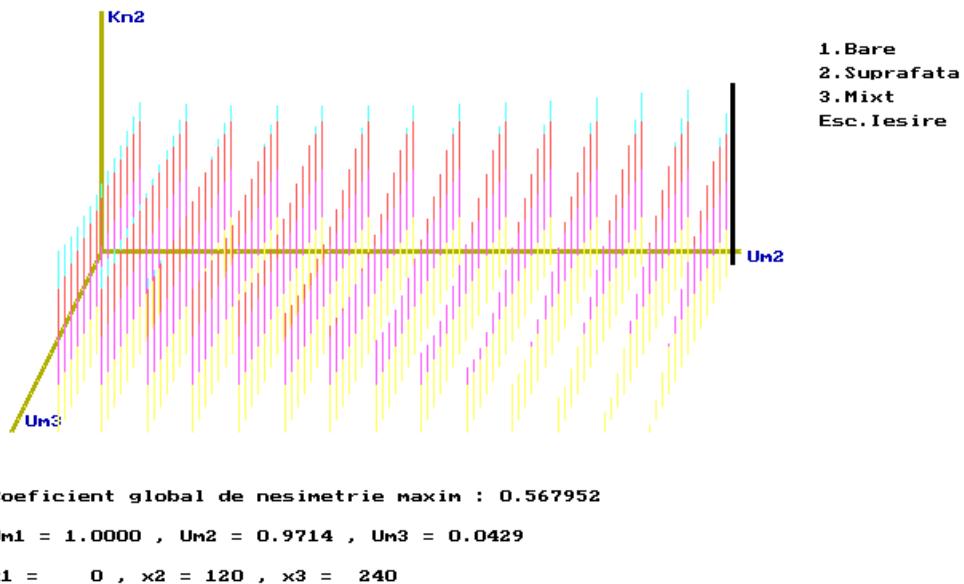
PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI**GLOBAL DE NESIMETRIE (VARK)**

Fig.3.32. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$
(varianta cu bare)

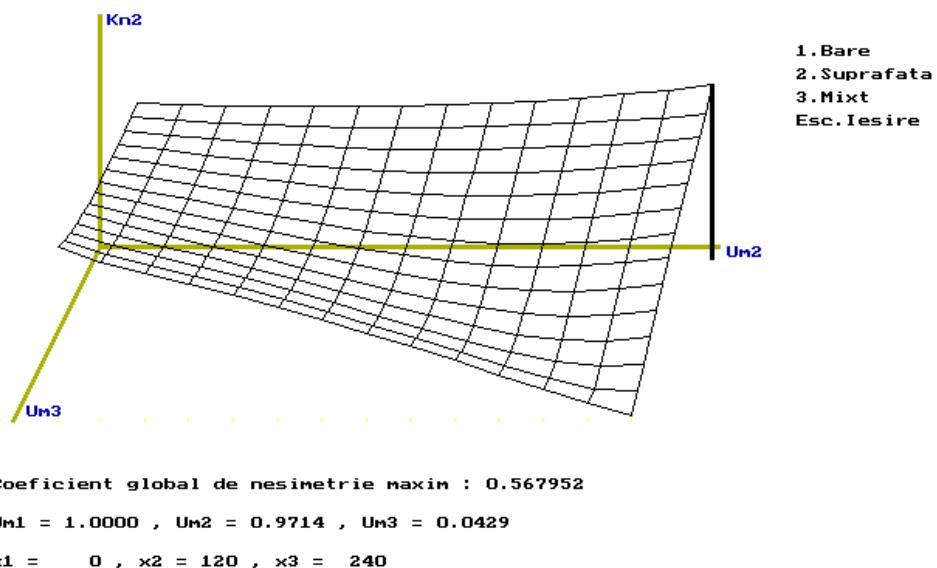
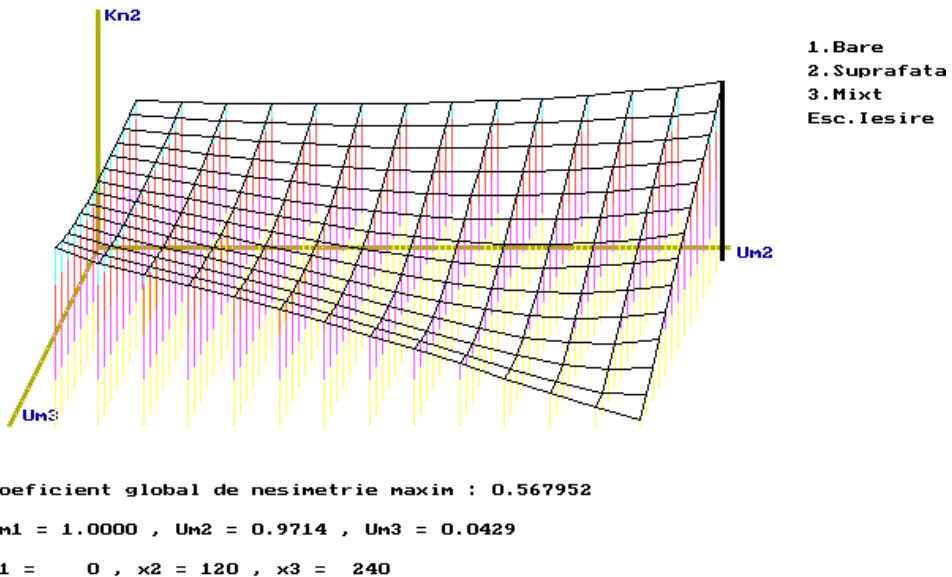
PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI**GLOBAL DE NESIMETRIE (VARK)**

Fig.3.33. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$
(varianta suprafață)

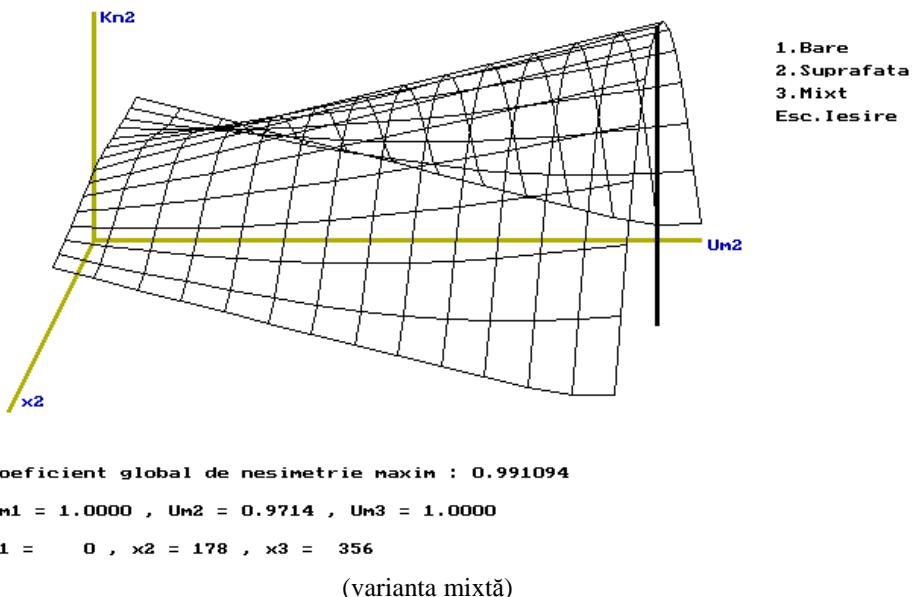
PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI

GLOBAL DE NESIMETRIE (VARK)

Fig.3.34. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$

PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI

GLOBAL DE NESIMETRIE (VARK)

Fig.3.35. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și x_2 și sunt constanți $U_{m3}=1$ și $x_3=356^0$

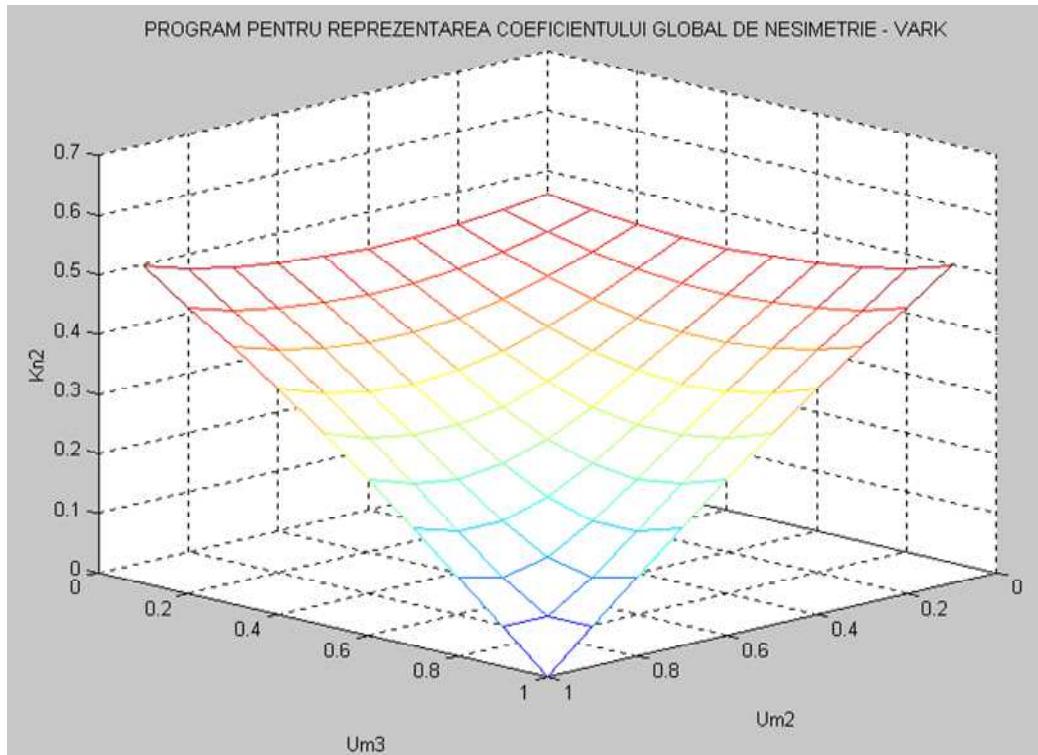
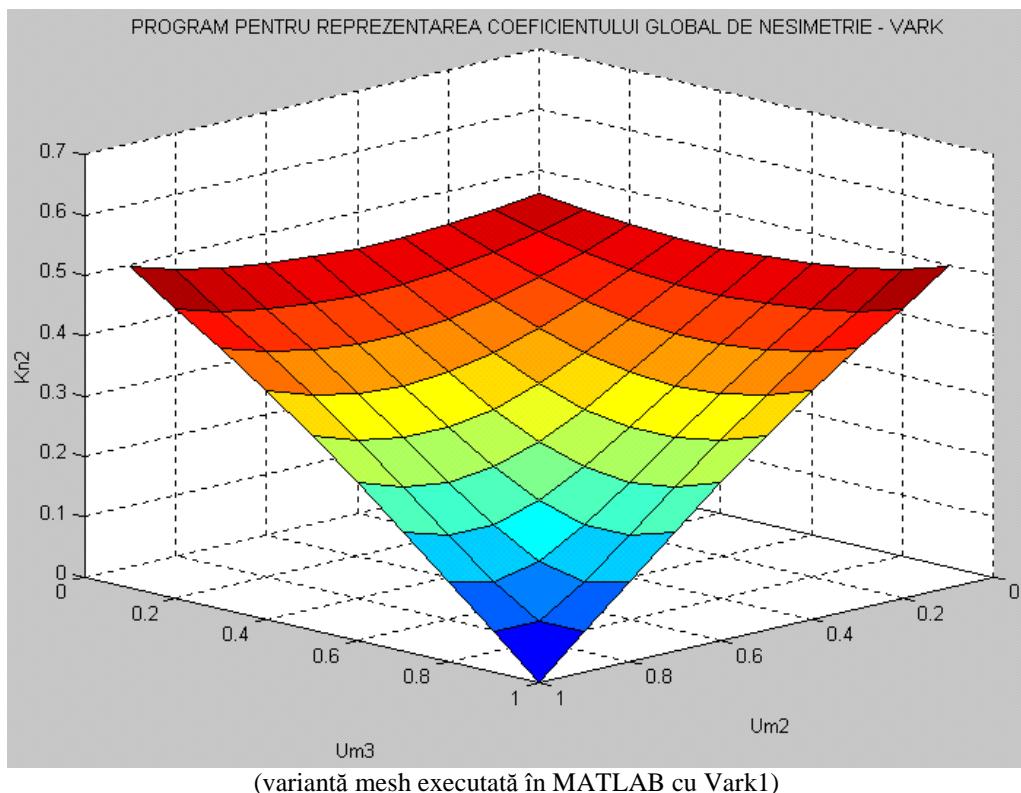


Fig.3.36. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$



(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark1)

Fig.3.37. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$
(variantă surf executată în MATLAB cu Vark1)

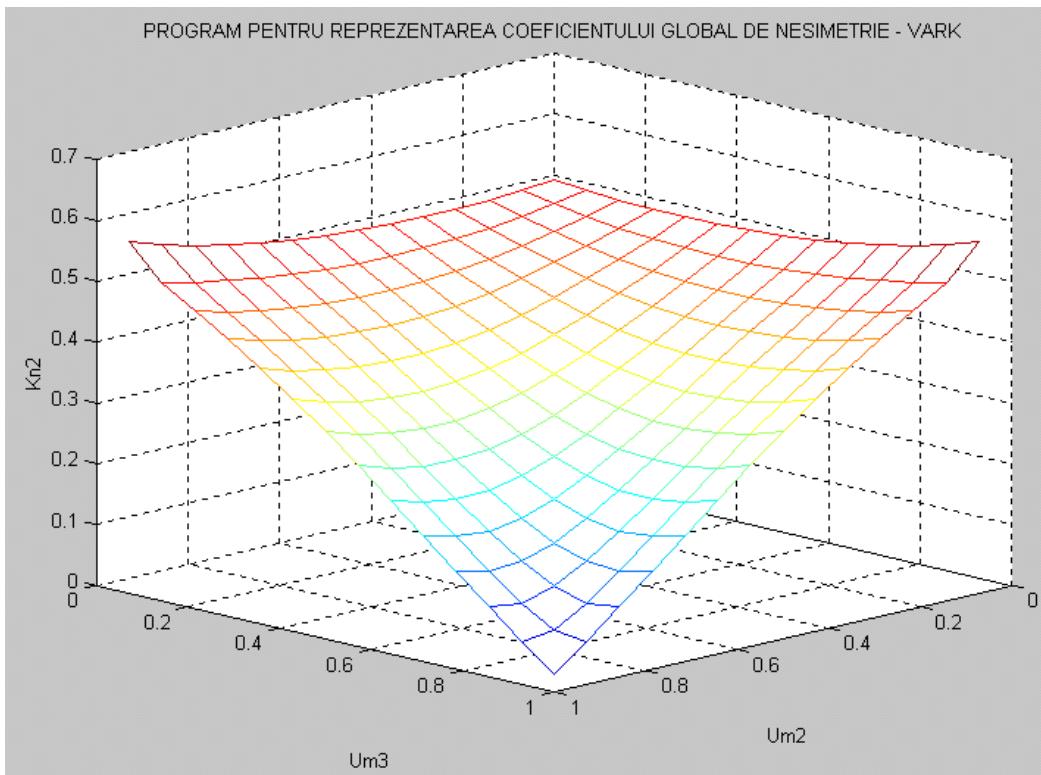


Fig.3.38. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^0$ și $x_3=240^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2)

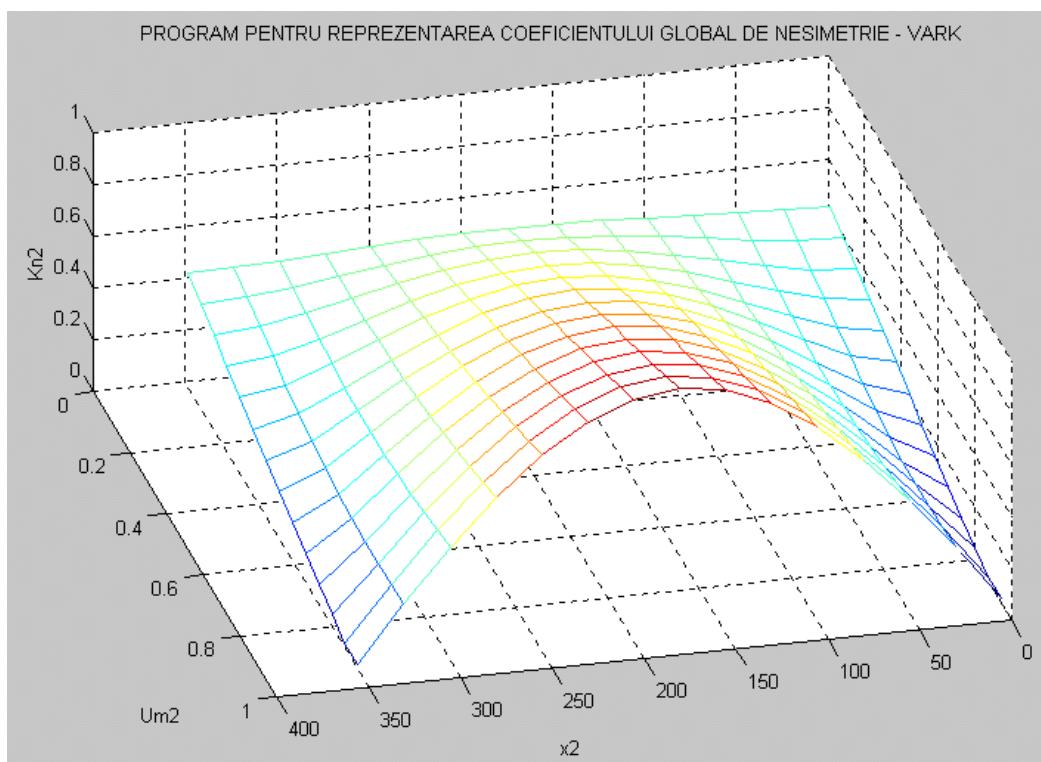


Fig.3.39. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și x_2 și sunt constanți $U_{m3}=1$ și $x_3=356^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2)

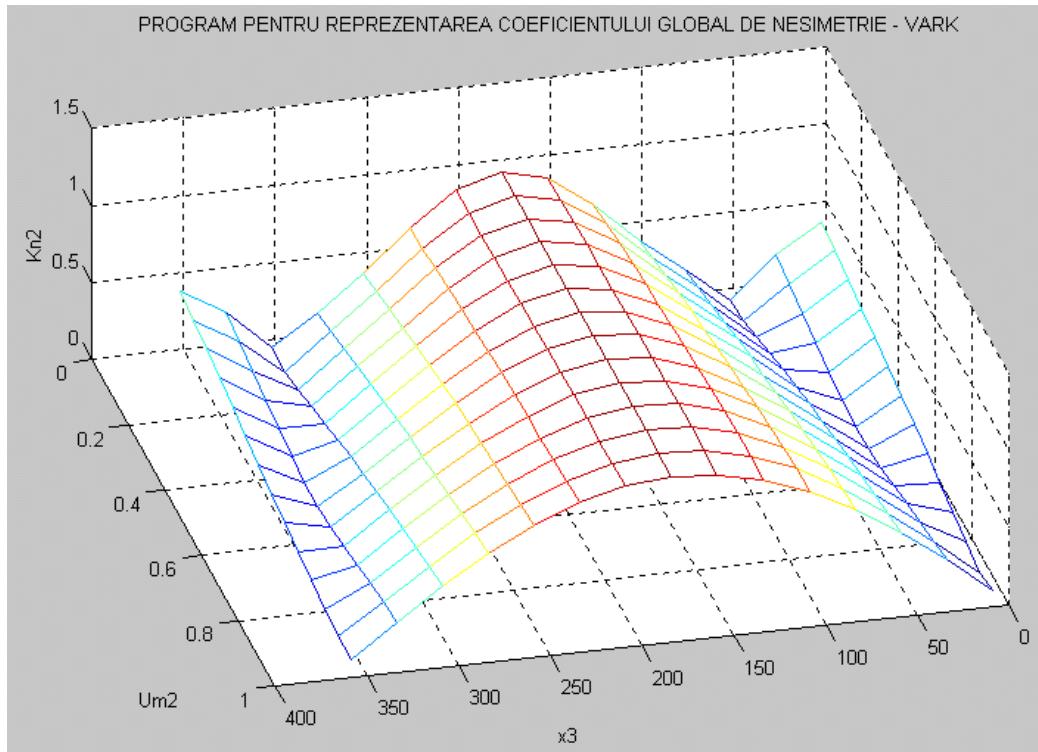


Fig.3.40. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și x_3 și sunt constanți $U_{m3}=1$ și $x_2=3^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2)

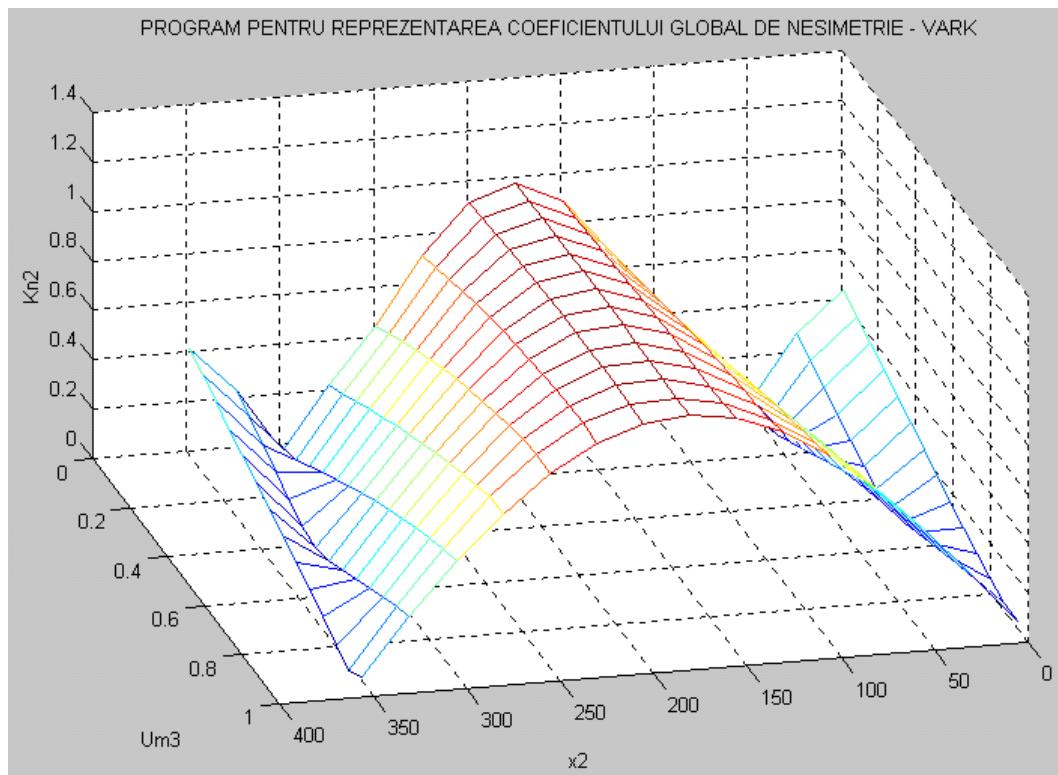


Fig.3.41. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_2 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_3=356^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2)

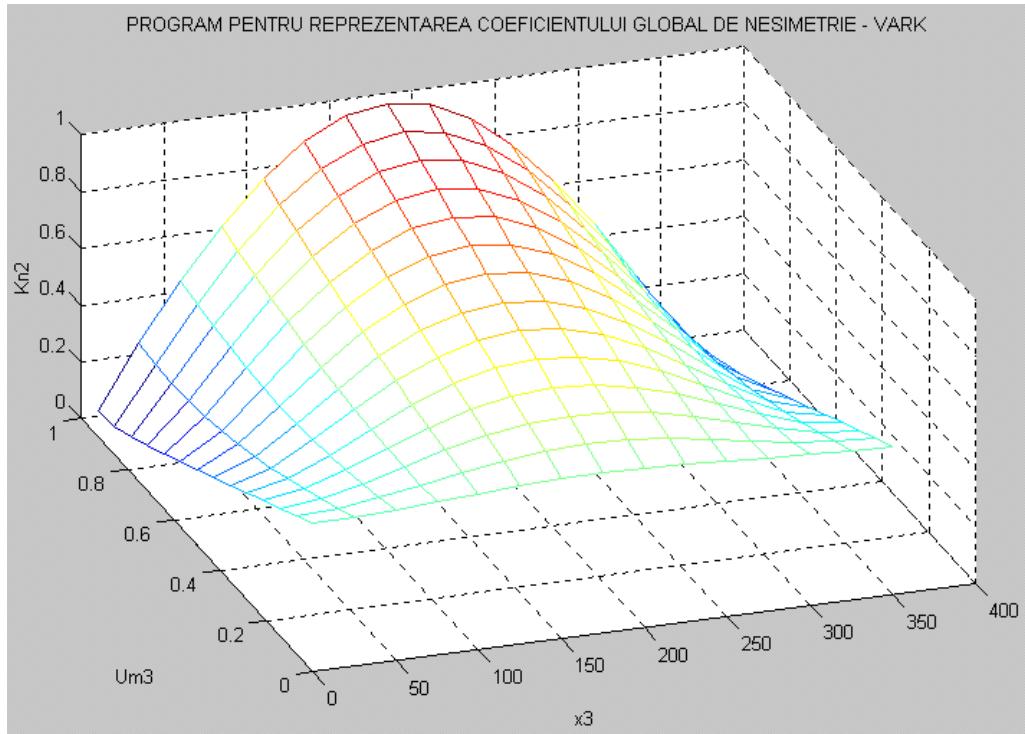


Fig.3.42. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_3 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_2=3^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2)

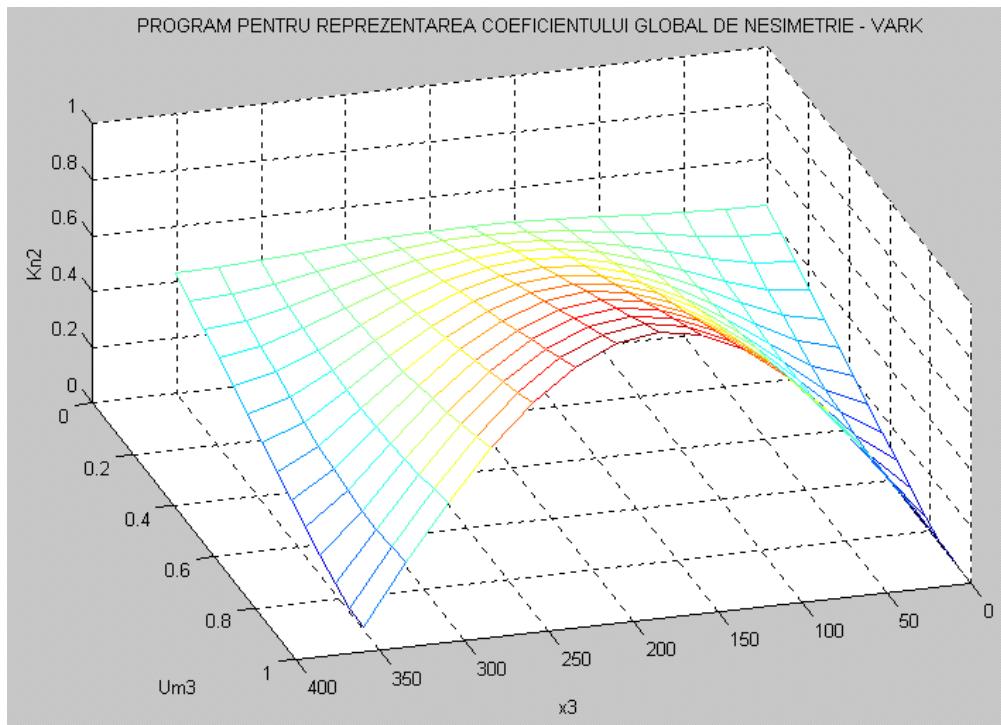


Fig.3.43. Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_3 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_2=3^0$
(variantă mesh executată în MATLAB cu Vark2, utilizând al unghi de vedere față de varianta anterioară)

Listingul programului **VARK** este dat în anexele acestei lucrări.

1.4. Concluzii și observații

În acest capitol s-au pus în evidență o serie de aspecte legate de funcționarea unei punți trifazate de diode alimentate cu un sistem nesimetric de tensiuni.

La început, s-a considerat cazul punții de diode ideale alimentând o rezistență pură. S-a prezentat o metodă analitică exactă de calcul, în cele patru cazuri care pot exista. De asemenea, s-au analizat o serie de cazuri particulare. Pe baza metodei analitice prezentate, s-a elaborat programul de calculator **PDIODE**. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**) au fost comparate cu cele obținute prin simulare pe calculator, respectiv prin măsurători experimentale în laborator.

S-a considerat apoi cazul punții de diode alimentând o sarcină complexă formată dintr-o rezistență, o inductivitate și o tensiune contraelectromotoare. S-a adoptat o metodă analitică de calcul preluată din literatura de specialitate [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S8]. Rezultatele obținute au fost comparate cu cele rezultate în urma simulării pe calculator.

În continuare se propune introducerea unui coeficient global de nesimetrie pentru sistemele trifazate nesimetrice. După cum se știe, în mod clasic se indică nesimetria unui sistem trifazat prin gradul de asimetrie și gradul de disimetrie. Pentru ca nesimetria unui sistem trifazat să fie relativ mică, ambele grade trebuie să fie mai mici decât niște valori admise convențional, de exemplu 5%. Coeficientul global de nesimetrie (k_n) indică nesimetria sistemului printr-un singur număr cuprins între 0 și 1,02. S-au prezentat formulele analitice de calcul ale lui k_n pentru cele patru cazuri și valorile lui pentru unele cazuri particulare. De asemenea, s-au prezentat programele de calculator **SISNES**, **CGN**, **MAXIK** și **VARK** care permit calcularea lui k_n , determinarea maximului și reprezentarea grafică a variației coeficientului global de nesimetrie, împreună cu rezultatele obținute.

La elaborarea acestui capitol care este în mare măsură original, autorul a adus următoarele contribuții originale:

- Propun o metodă analitică exactă de calcul pentru puntea de diode ideale alimentată nesimetric.
- Evidențiez existența a patru cazuri, fiecare cu setul de formule corespunzător.
- Formulez și demonstrez “teorema pozițiilor” legată de existența celor patru cazuri.
- Elaborez programul de calculator **PDIODE** pentru analiza punții de diode alimentată nesimetric.
- Adaptez după literatura de specialitate o metodă analitică pentru puntea de diode alimentată nesimetric și având o sarcină complexă.
- Propun un nou indicator pentru nesimetria sistemelor trifazate, pe care l-am numit coeficient global de nesimetrie, indicând formulele de calcul pentru acesta.
- Elaborez programul de calculator **SISNES**, conținând subprogramele **CGN** și **MAXIK** pentru analiza sistemelor nesimetrice, calculul coeficientului global de nesimetrie și determinarea maximului acestui coeficient.
- Elaborez programul de calculator **VARK** pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (cu două variante de aplicare: Vark1 și Vark2).
- Realizez utilizarea programului **VARK** în mediul **MATLAB** pentru obținerea unor reprezentări 3D cu parametri îmbunătățiți.

CAPITOLUL 2
APLICAȚIE – REALIZAREA UNUI
DISPOZITIV DE PROTECȚIE ANTIBIFAZICĂ

2. APLICAȚIE-REALIZAREA UNUI DISPOZITIV DE PROTECȚIE ANTIBIFAZICĂ

În acest capitol se prezintă o aplicație a teoriei expuse anterior, legată de puntea de diode alimentată nesimetric. Nesimetria sistemului trifazat de tensiuni aplicat punții va fi sesizată prin intermediul coeficientului global de nesimetrie definit în subcapitolul 1.3. Acest sistem de tensiuni este proporțional cu sistemul curenților de linie absorbiți de un motor asincron trifazat și este furnizat de trei traductoare curent-tensiune.

2.1. Regimuri nesimetrice sau dezechilibrate la funcționarea unui motor asincron trifazat

După cum se știe, motoarele asincrone trifazate, care au ponderea cea mai însemnată în acțiunile industriale moderne, funcționează în mod normal în regim simetric și echilibrat [D8], [F5], [G5], [N4], [N5], [R8].

Ele pot însă ajunge să funcționeze în regimuri anormale, cum sunt cele de nesimetrie și/sau de dezechilibru. [A3], [B4], [F5], [P34], [S26], [W8], [W10].

Astfel, este posibil ca un motor asincron trifazat, care este un receptor echilibrat, să fie alimentat cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni. [B4], [N4], [S26], [W8], [W10]. În această situație, curenții din fazele statorului nu formează nici un sistem simetric. Ca urmare, câmpul magnetic din întrefierul mașinii are două componente care se rotesc în sensuri contrare: un câmp magnetic învârtitor direct și un câmp magnetic învârtitor invers. Amplitudinile acestor două câmpuri nu sunt egale între ele, cu excepția cazului particular al motorului asincron monofazat. Câmpul magnetic direct induce în rotor tensiuni și curenți de frecvență $f_d = sf$, iar câmpul magnetic invers induce în rotor tensiuni și curenți de frecvență $f_i = (2-s)f$. Prin urmare, putem considera că mașina reală se compune din două mașini fictive, una directă și alta inversă. Cuplurile dezvoltate de cele două mașini fictive sunt de sensuri contrare, iar cuplul resultant este suma algebraică a celor două cupluri. Cuplul invers are rolul unui cuplu de frânare; din acest motiv, la același cuplu rezistent, curentul absorbit de motor de la rețea, precum și alunecarea sunt mai mari decât cele de la cazul funcționării normale, simetrice, a motorului respectiv. În general cele două cupluri nu au amplitudini egale iar când rotorul este în repaus, cuplul resultant este diferit de zero și motorul pornește. În cazul limită al nesimetriei monofazate, cele două cupluri care apar au amplitudini egale, iar când rotorul este în repaus cuplul resultant este nul, deci motorul nu poate porni singur. Situația funcționării unui motor asincron trifazat cu un sistem de tensiuni de alimentare nesimetric este o situație de avarie (a liniei de alimentare).

O altă situație posibilă de funcționare este atunci când sistemul de tensiuni de alimentare este simetric, dar motorul este un receptor dezechilibrat. Astfel, sunt posibile apariția unor scurtcircuite în înfășurările statorului [F5], [G5], [N4], [R8]. Scurtcircuitele pot fi bifazate sau monofazate, iar până la acționarea sistemului de protecție, motorul va funcționa într-un regim dezechilibrat (și nesimetric pentru curenții absorbiți). Există și posibilitatea funcționării motorului asincron trifazat cu înfășurarea rotorică dezechilibrată electric [D8], [F5], [G5], [R8]. Dezechilibrul electric al rotorului poate fi produs de întreruperea unei faze a rotorului (în cazul motoarelor cu rotor bobinat), respectiv de întreruperea unor bare ale coliviei rotorului (în cazul motoarelor cu rotorul în colivie). Rezultă dezechilibre în circuitul rotoric; la limită, circuitul rotoric poate ajunge să fie monofazat.

În sfârșit, o a treia situație care se poate întâlni este când sistemul de tensiuni de alimentare este nesimetric iar motorul este un receptor dezechilibrat [F5], [G5], [N4].

Dintre toate situațiile descrise mai sus, de o mare importanță sunt cazurile în care se întrerupe o fază, deci când motorul funcționează cu o fază întreruptă (respectiv, funcționează în două faze). Dacă protecția motorului nu acționează corespunzător, se poate ajunge la deteriorarea motorului respectiv (“arderea” motorului). Practica exploatarii industriale ne demonstrează că acest fenomen este des întâlnit și deci se impune studierea lui și introducerea unor metode de protecție antibifazică mai eficiente.

2.2. Funcționarea motoarelor asincrone trifazate cu o fază întreruptă

Motorul asincron trifazat poate ajunge să funcționeze cu o fază întreruptă fie ca urmare a întreruperii unui fir de alimentare al rețelei, fie ca urmare a întreruperii unei faze în interiorul mașinii. Motorul trece în regim monofazat de funcționare, cu unele consecințe care vor fi descrise în continuare.

În primul rând, evidențiem faptul că efectul întreruperii unei faze este diferit, după cum întreruperea se produce când motorul este în repaus sau în mișcare. Dacă motorul este în repaus și are o fază statorică întreruptă, atunci la conectarea la rețea motorul nu pornește. Dacă întreruperea fazei se produce când motorul funcționează normal, atunci motorul continuă să funcționeze, deoarece dezvoltă cuplu, dar caracteristicile mașinii sunt modificate (de exemplu, factorul de putere scade).

Deși fenomenele principale sunt același, totuși există diferite particularități în funcție de tipul conexiunii înfășurării statorului.

În continuare, vom considera pe rând motoare cu statorul conectat în stea cu nulul izolat și respectiv motoare cu statorul conectat în triunghi.

2.2.1. Întreruperea unei faze pentru un motor cu înfășurarea statorică conectată în stea cu nulul izolat.

Schema motorului pentru acest caz este reprezentată în figura 2.1.

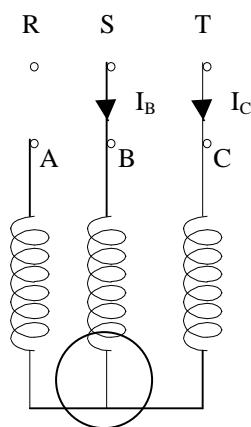


Fig.2.1. Motor asincron cu conexiunea statorului în stea, un conductor de alimentare fiind întrerupt

Analiza acestui caz este făcută detaliat în tratatele de mașini electrice, utilizând teoria coordonatelor simetrice [F5], [G5], [N4], [R8]. Concluziile obținute sunt redate în continuare.

Presupunem că întreruperea fazei A s-a făcut în timpul funcționării normale a motorului. Observăm că în acest caz nu are importanță dacă întreruperea este în afara motorului sau în interiorul lui. Motorul continuă să funcționeze dar în condiții de avarie.

Concluziile care rezultă sunt:

a). Cuplul critic (maxim) și alunecarea critică sunt de două ori mai mici în cazul întreruperii unei faze a statorului față de cazul funcționării normale.

Este util să scoatem în evidență că dacă în regim normal, adică înainte de întreruperea unei faze a statorului, motorul a funcționat la sarcină nominală, iar cuplul maxim al motorului este puțin

peste dublul cuplului nominal, atunci după întreruperea unei faze a statorului, motorul va funcționa aproape de cuplul maxim și respectiv de alunecarea critică. Cu alte cuvinte, din punctul de vedere al acționării electrice a sarcinii mecanice utile, situația poate deveni o situație "la limită".

b). Curentul absorbit din rețea prin fazele sănătoase (fazele B și C) va fi mai mare de circa 2 ori decât în cazul funcționării normale, în regim trifazat simetric. Aceasta conduce la încălzirea accentuată în timp, în cazul nefuncționării corecte a protecției motorului, a bobinajului statorului și la posibila deteriorare termică a lui.

Creșterea curentului, menționată mai sus, depinde de doi parametri: raportul dintre cuplul dezvoltat de motor (impus de cuplul mecanic util) și cuplul nominal (m_c) și de raportul dintre cuplul critic și cel nominal, la tensiunea nominală și frecvența nominală (b_n). [F5].

Mai exact, avem relațiile de definiție:

$$m_c = \frac{M}{M_n} \quad (2.1)$$

$$b_n = \frac{M_k}{M_n} \quad (\text{pentru } U=U_n, f=f_n) \quad (2.2)$$

Creșterea curenților în situația funcționării cu o fază întreruptă față de situația funcționării normale în regim trifazat este ilustrată sugestiv în nomogramele prezentate în figurile 2.2. și 2.3.

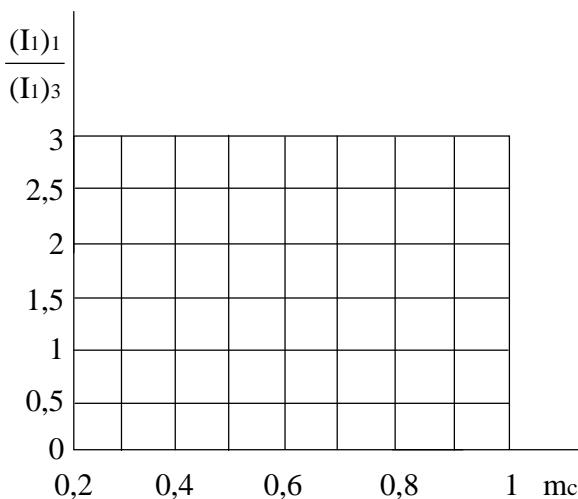


Fig.2.2. Variația raportului $(I_1)_1 / (I_1)_3$ funcție de m_c ,

pentru $b_n=2$.

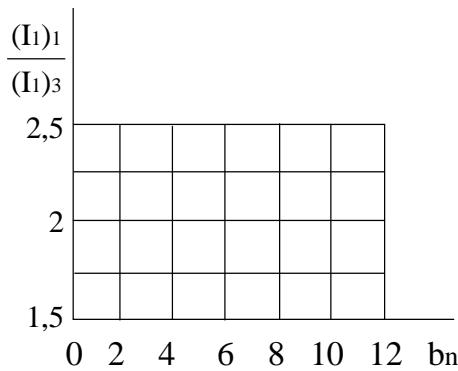


Fig.2.3. Variația raportului $(I_1)_1 / (I_1)_3$

funcție de b_n , pentru $m_c=1$.

Am utilizat următoarele notații:

$(I_1)_1$ = curentul absorbit din rețea la funcționarea cu o fază întreruptă (regim monofazat).

$(I_1)_3$ = curentul absorbit din rețea la funcționarea normală în regim trifazat simetric.

Din figura 4.2. rezultă că la cupluri mai mari decât $0,47 M_n$, curentul absorbit din rețea este totdeauna mai mare în cazul motorului funcționând cu o fază întreruptă.

c). Curenții de linie, absorbiți de motor din rețea formează un sistem trifazat nesimetric. Mai exact, în cazul de față, avem un sistem accentuat nesimetric, corespunzând funcționării monofazate (a se vedea terminologia introdusă în capitolul 3.).

2.2.2. Întreruperea unei faze pentru un motor cu înfășurarea statorică conectată în triunghi.

În acest caz, putem avea două situații, după cum întreruperea se face în exteriorul motorului sau în interiorul motorului (figura 2.4., respectiv figura 2.5.).

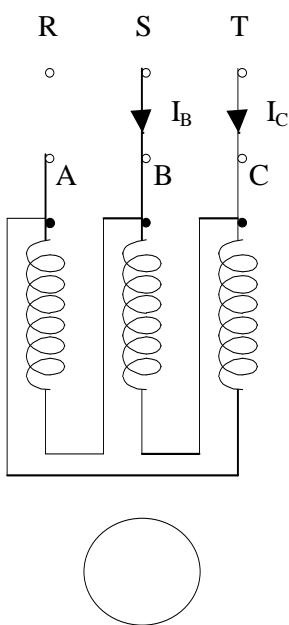


Fig.2.4. Motor asincron cu conexiunea statorului în triunghi, un conductor de alimentare fiind întrerupt.

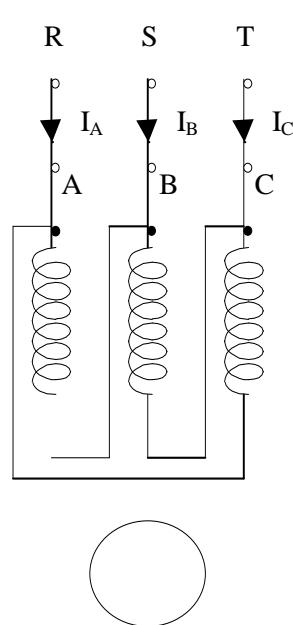


Fig.2.5. Motor asincron cu conexiunea statorului în triunghi, o fază fiind întreruptă în interiorul motorului.

O analiză asemănătoare făcută acestui caz (respectiv a celor două subcazuri care pot exista) conduce la concluzii asemănătoare, din punctul de vedere al curenților de linie, absorbiți de statorul motorului [F5], [G5], [R8].

În subcazul arătat în figura 2.4., curentul absorbit $I_B=I_C$ crește de circa 2 ori iar sistemul trifazat al curenților de linie este accentuat nesimetric, corespunzător funcționării monofazate.

Avem deci o situație asemănătoare cu cea anterioară, de la legarea în stea.

În subcazul arătat în figura 2.5., curenții I_A și I_B se modifică relativ puțin dar curentul I_C crește de aproximativ 1,73 ori în situația de avarie. Din nou, apare o nesimetrie a curenților de linie.

2.3. Realizarea protecției antibifazice.

Protecția antibifazică este realizată în mod normal de releele termice, care există în orice schemă de acționare cu un motor asincron trifazat. La o alegere și o reglare corespunzătoare a acestor relee termice, se poate asigura teoretic protecția antibifazică a motorului respectiv.

Practica demonstrează că în multe cazuri, din diverse motive, acest rol de protecție al releelor termice nu se realizează corespunzător și în consecință se ajunge la deteriorarea (arderea) bobinajului motoarelor.

Din acest motiv, s-au conceput și realizat în timp diverse metode de protecție antibifazică. [F3], [M1], [P4], [P14], [P26], [R12], [R14], [R15], [R16], [R19].

Ele funcționează pe baza următoarelor principii:

1. Sesizarea deplasării neutrului.
2. Sesizarea apariției unui sistem nesimetric, utilizând filtre de componente homopolare și/sau componente inverse, sau într-un mod echivalent
3. Sesizarea încălzirii suplimentare a motorului cu ajutorul unor termistoare introduse în interiorul motorului.

În țara noastră s-au elaborat, în timp, diverse dispozitive pentru protecția antibifazică a motoarelor asincrone trifazate. La Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci pot fi consultate descrierile unor invenții în acest sens. Ele sunt bazate pe primele două principii arătate mai înainte și fiecare din ele au din punct de vedere practic o serie de avantaje, dar și unele dejeavantaje specifice. Fără a intra în amănunte, menționăm aceste realizări:

- Dispozitiv de protecție pentru electromotoare (titular Grupul de întreprinderi de utilaje și construcții București, 1971).
- Releu de protecție pentru motoare electrice trifazate (titular Institutul de cercetări și proiectări electrotehnice București, 1971).
- Releu de protecție antibifazică (titular Institutul de cercetări și proiectări electrotehnice București, 1978).

- Dispozitiv de deconectare a electromotoarelor trifazate la mersul în două faze (titular Întreprinderea de spirt și drojdie București, 1987).

Mai recent, după 1990, au fost proiectate și realizate în țară următoarele dispozitive de protecție antibifazică:

- Dispozitiv de sesizare a tensiunii trifazate (**DSTT**). Acest dispozitiv e realizat la RENEL-GSCI (Grupul de Studii, Cercetări și Inginerie) București. Dispozitivul sesizează tensiunea de dezechilibru care apare între nulul rețelei și un nul artificial în cazul dispariției unei faze. El este aplicat la centrala electrică de la Clopotiva (județul Hunedoara).
- Releu electronic pentru protecția motoarelor electrice trifazate **RE -02-MS**. Acest releu este realizat de firma EE Tim (din Timișoara) și pe lângă protecția antibifazică mai realizează și protecția la suprasarcini îndelungate (deci realizează și funcția unui releu termic).

Dintre realizările recente, pe plan mondial, menționăm pe cele ale firmelor ABB și Telemecanique (Groupe Schneider).

Releul de protecție SPAM 150 C al firmei ABB realizează protecția motoarelor electrice trifazate pentru toate situațiile de avarie care pot interveni în timpul funcționării. Cu alte cuvinte, releul realizează protecția multiplă a motoarelor electrice, indicând de asemenea o serie de date privind funcționarea, cu afișare numerică. El este realizat cu microprocesor și are o construcție versatilă, pentru selectarea ușoară a diverselor aplicații.

Releul de protecție multifuncțional LT8 al firmei Telemecanique asigură protecția motoarelor în cazul supraîncălzirii termice, în cazul nesimetriei la alimentare sau a absenței unei faze, în cazul defectelor de izolație și în cazul pornirii grele sau a rotorului blocat. Releul realizează funcția de autocontrol în permanență, garând astfel un înalt grad de securitate al motorului protejat. Adăugarea unui modul de vizualizare la distanță permite transmiterea tuturor parametrilor de exploatare la un post de supraveghere.

Ultimele cercetări în domeniul preconizează combinarea funcției de protecție cu cea de monitorizare a motorului respectiv [R2], [S12]. Se urmărește chiar obținerea de informații euristice despre defectele incipiente. În acest scop se utilizează rețele neuronale [G8], [G9], [K4]. Este evident că aplicarea unor astfel de metode complexe se justifică în practică în cazul motoarelor de mare putere, utilizate în acționări speciale, care necesită un înalt grad de fiabilitate în exploatare.

2.4. Concepția, proiectarea și realizarea unui dispozitiv de protecție antibifazică funcționând pe baza unui principiu nou.

Dispozitivul de protecție antibifazică (DPAB) are la bază constatarea făcută în capitolul 3 că tensiunea de ieșire dintr-o punte trifazată de diode nu are o armonică de 100Hz atunci când puntea este alimentată simetric și conține o armonică importantă de 100Hz deîndată ce puntea trece în regim monofazat.

Schema bloc a dispozitivului de protecție antibifazică [P26], [R16], [R19] este prezentată în figura 2.6.

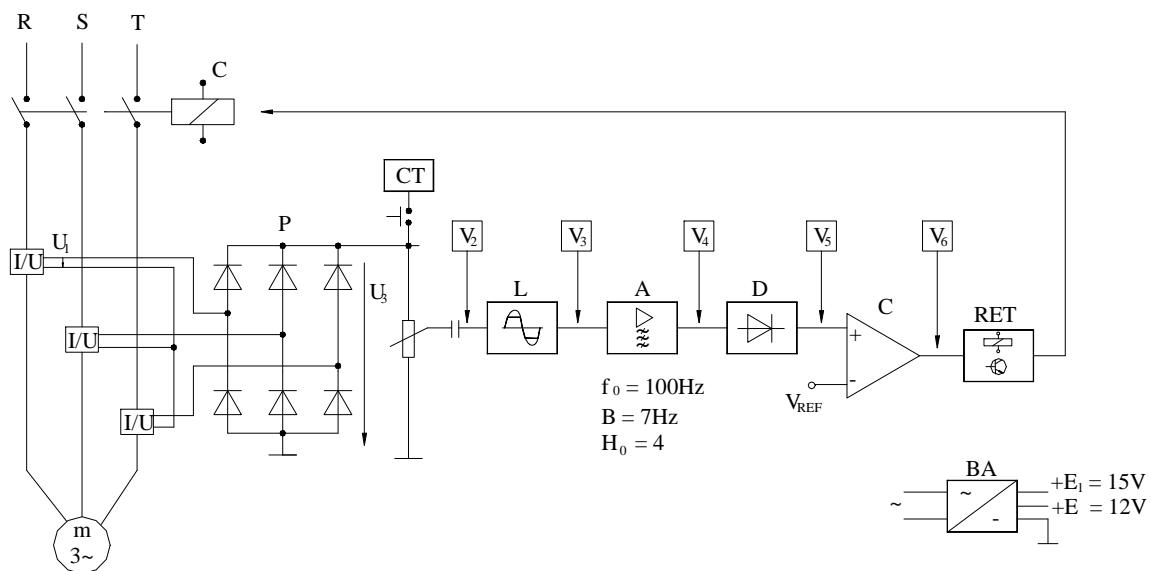


Fig.2.6. Schema bloc a dispozitivului de protecție antibifazică.

Elementele din schema bloc au următoarele semnificații:

I / U	– traductoare curent / tensiune pe punte trifazată.	– punte trifazată.
L	– bloc de limitare	A – amplificator selectiv
D	– bloc de detecție	C – comparator cu histerezis
RET	– releu electronic cu temporizare	CT – circuit de testare
BA	– bloc de alimentare	C – contactor

La funcționarea normală a motorului asincron trifazat, tensiunea de ieșire a punții p conține armonica fundamentală cu frecvența $6f_R = 300\text{Hz}$ (unde f_R este frecvența rețelei de alimentare, $f_R=50\text{Hz}$). La întreruperea unei faze, tensiunea de ieșire a punții are armonica fundamentală cu frecvența $2f_R = 100\text{Hz}$. Această armonică este amplificată de amplificatorul selectiv, detectată și aplicată comparatorului, care prin intermediul unui releu electronic provoacă declanșarea contactorului C, determinând decuplarea motorului.

Traductoarele I / U sunt de concepție originală, cu reacție și s-au dimensionat astfel încât să asigure o caracteristică de transfer aproximativ liniară (miezurile lor magnetice să nu se saturizeze nici în regimul de pornire al motorului asincron). S-a adoptat inițial tensiunea de ieșire a convertoarelor I / U în regimul de defect $U_{2D}=3...6\text{V}$.

Amplificatorul selectiv este de tipul trece banda, cu amplificarea la frecvența centrală $H_0=4$.

S-a adoptat o schemă de filtru activ de ordinul II, cu reacții multiple, de tipul Rauch. Pentru realizarea amplificatorului selectiv s-a ales circuitul integrat $\beta M 3900$ (4 x Norton). Pentru filtru se folosesc 2 amplificatoare Norton, celelalte două fiind folosite la realizarea etajului comparator de tensiune. Filtrul realizează o foarte bună atenuare în banda de tăiere (peste 40 dB / decadă).

Etajul comparator de tensiune realizează un interval de siguranță suplimentar la zgromot.

Releul electronic acționează cu o mică temporizare ($T < 1\text{s}$) pentru a preveni acționarea falsă a protecției, la regimurile tranzitorii ale motorului (pornire, șocuri de sarcină, etc.). În acest scop s-a realizat un circuit de temporizare pentru releul electric.

Circuitul de testare are două funcții: de a permite acordarea în modul cel mai simplu a filtrului activ pe frecvența centrală egală cu dublul frecvenței de rețea și de a permite testarea periodică a bunei funcționări a dispozitivului de protecție antibifazică, la utilizator.

Dispozitivul de protecție antibifazică se realizează în trei variante constructive: A, B și C. Varianta A are 8 subvariante constructive iar varianta B are 3 subvariante constructive. Dispozitivul de protecție antibifazică se alege funcție de puterea motorului protejat în varianta și subvarianta corespunzătoare. Toate variantele constructive (A, B, C) ale dispozitivului de protecție au o parte electronică identică și ele diferă numai prin elementele de conectare la circuitele de forță și de comandă ale motorului (traductoare de curent și releu de ieșire). Variantele A și B au traductoarele de curent conectate direct în circuitul de forță al motorului protejat. Aceste traductoare sunt constructiv diferite prin dimensiunile miezului magnetic. Subvariantele diferă între ele numai prin numărul de spire al înfășurării de curent. Varianta C folosește un traductor de curent având

înfășurarea de curent dimensionată la 5A și se conectează la circuitul de forță prin intermediul unor transformatoare de curent având $I_{1n} \approx I_n$ motor și $I_{2n} = 5A$.

Dispozitivul de protecție antibifazică (**DPAB**) a fost brevetat, brevetul de invenție având numărul 87118 [R16].

S-a realizat un model experimental care a fost testat pe standul pentru încercarea motoarelor electrice, stand care a fost construit prin autodotare în laboratorul de electrotehnica [R18]. Standul este prevăzut cu o frână cu curenți turbionari, proiectată și construită de asemenea în laboratorul de electrotehnica [R17]. Prin încărcarea motorului cu diverse cupluri de sarcină s-a putut testa dispozitivul de protecție antibifazică în diverse regimuri de funcționare ale motorului protejat. Funcționarea dispozitivului de protecție a fost corespunzătoare.

În figura 2.7. se prezintă standul de laborator utilizat pentru testarea dispozitivului de protecție antibifazică.

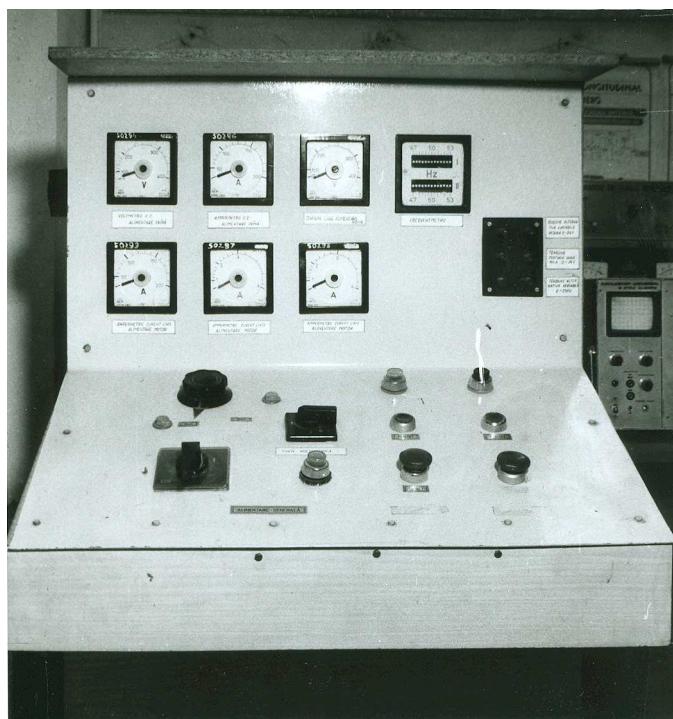


Fig.2.7. Stand de laborator utilizat pentru testarea dispozitivului de protecție antibifazică la diverse regimuri de funcționare ale motorului protejat.

Proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică s-a făcut în cadrul unui contract de cercetare- proiectare încheiat cu întreprinderea S.C. "RELEE" S.A. Mediaș [R19]. Dispozitivul de protecție antibifazică a fost omologat la S.C."RELEE" S.A. Mediaș și asimilat în producția de serie, existând posibilitatea producerii lui, funcție de cerințele beneficiarilor. După o perioadă de stagnare datorată condițiilor grele cauzate de restructurare și tranziția la economia de piață, există în momentul de față o preocupare susținută la nivelul conducerii întreprinderii pentru promovarea

acestui dispozitiv de protecție antibifazică. (**DPAB**). Astfel, în cursul anului 1998 s-a realizat reproiectarea și modernizarea acestui produs, însotită de îmbunătățirea tehnologiei de construcție.

În figura 2.8. se prezintă dispozitivul de protecție antibifazică (**DPAB**) construit la firma S.C. “RELEE” S.A. Mediaș.



Fig.2.8. Dispozitiv de protecție antibifazică.

Legat de protecția motoarelor asincrone trifazate s-a conceput și s-a brevetat un cuplaj-frână electromagnetic. Brevetul de invenție are numărul 108.833 [R20]. Cuplajul-frână electromagnetic realizează o serie de funcții în acționarea electrică, între care și cea de protecție a motorului.

Traductoarele de curent sunt în prezent în curs de brevetare. În figura 2.9. sunt prezentate traductoarele de curent folosite la realizarea dispozitivului de protecție antibifazică.

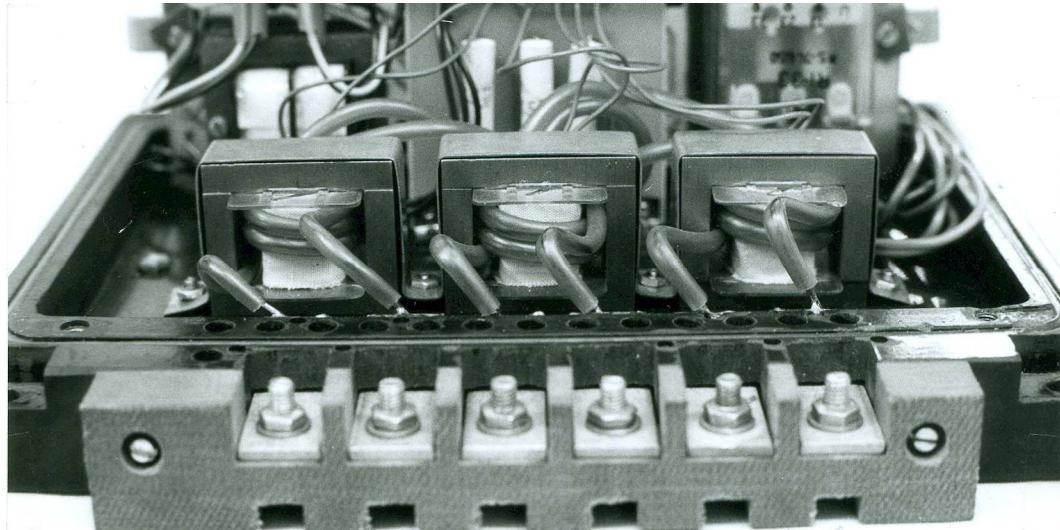


Fig.2.9. Traductoare de curent utilizate în construcția dispozitivului de protecție antibifazică.

2.5. Concluzii și observații

În cadrul capitolului 2 s-a făcut la început o prezentare sintetică a regimurilor nesimetrice și / sau dezechilibrate de funcționare ale motoarelor asincrone trifazate. S-a insistat asupra funcționării cu o fază întreruptă, cauza des întâlnită a “arderii” multor motoare în acționările industriale. S-a arătat că indiferent de conexiunea din stator, curenții de linie cresc în general de circa 2 ori și formează un sistem trifazat nesimetric.

În continuare s-au prezentat unele realizări la nivelul țării noastre și pe plan mondial pe linia protecției antibifazice.

Apoi s-a descris concepția, proiectarea și realizarea unui dispozitiv original de protecție antibifazică a motoarelor asincrone trifazate. Acest dispozitiv a fost asimilat în fabricație la S.C. “RELEE” S.A. Mediaș și introdus ca protecție suplimentară în schemele clasice de acționări poate conduce la realizarea de importante economii bănești, prin evitarea arderii motoarelor electrice și deci a cheltuielilor cu rebobinarea lor.

Comparativ cu soluțiile existente, dispozitivul realizat se caracterizează prin simplitate constructivă, fiabilitate ridicată în exploatare și preț de cost redus. Se poate utiliza pentru protecția oricărui motor asincron trifazat (indiferent de conexiunea statorului, în stea sau triunghi) și deoarece analizează curenții absorbiți, el sesizează defectele atât în amonte cât și în aval față de punctul de conectare în circuit.

În cadrul prezentului capitol, autorul a adus o serie de contribuții originale, care vor fi enumerate în continuare:

- Propun un dispozitiv original de protecție antibifazică a motoarelor asincrone trifazate (brevetat, brevet de invenție cu numărul 87118). Acesta funcționează pe baza sesizării nesimetriei sistemului de curenți de linie absorbiți din rețea de motorul protejat. Mai exact,

nesimetria este sesizată prin intermediul coeficientului global de nesimetrie de ordinul 1 (a se vedea teoria expusă în capitolul 1).

- Realizez un model experimental, pe care îl testează pe standul construit în laboratorul de electrotehnică prin autodotare.
- Realizez proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică în cadrul unui contract de cercetare-proiectare cu S.C. "RELEE" S.A. Mediaș. Pe baza acestui proiect, produsul este omologat și asimilat în fabricație la această întreprindere.
- Propun un cuplaj-frână electromagnetic pentru acțiunările cu motoare electrice asincrone, care are între altele și rolul de protecție a motorului respectiv (brevetat, brevet de invenție cu numărul 108833).
- Propun brevetarea traductoarelor de curent utilizate în construcția dispozitivelor de protecție antibifazică. Aceste traductoare sunt în curs de brevetare.

Situația actuală în domeniul protecției motoarelor asincrone.

În continuare se va prezenta pe scurt situația actuală (la nivelul anului 2011) în domeniul protecției motoarelor asincrone. Protecția include și protecția împotriva funcționării cu o fază întreruptă. Există realizări remarcabile, aparținând unor firme de renume care asigură protecția motoarelor asincrone la performanțe superioare. Se vor prezenta pe scurt realizările respective. Cititorul interesat de amănunte este îndrumat spre o cercetare detaliată folosind internetul și literatura tehnică de specialitate.

1. Sistemul de relee electronice ZEV pentru protecția motoarelor electrice. Producătorul este firma Moeller Electric. Sistemul cu relee electronice ZEV realizează protecția motoarelor atât prin măsurarea indirectă a temperaturii prin intermediul curentului, cât și prin măsurarea directă a temperaturii în motor cu ajutorul termistoarelor. Indirect se realizează supravegherea motorului la suprasarcină, cădere fazelor și curent asimetric. Suplimentar, releul protejează motorul împotriva defectelor de punere la pământ.

2. Releul diferențial GFI 025 produs de firma Ganz în colaborare cu o firmă de renume vest europeană. Este un dispozitiv de protecție la curenți de defect. Dispozitivele GFI pot fi cu 2 sau cu 4 poli. Aceste dispozitive funcționează pe principiu magnetic, nu electric. Dispozitivele GFI (cu 2 sau 4 poli) nu conțin dispozitive de protecție incluse. Pentru asigurarea protecției la suprasarcină sau scurtcircuit se va interveni obligatoriu, prin amplasarea în amonte, a unui miniîntrerupător automat de curent (siguranță automată) de curenți nominali adecvați.

3. Releul electronic de suprasarcină Siemens 3RB10/20. Acest releu oferă și protecție la întreruperea unei faze. Releele electronice de suprasarcină Siemens 3RB10/20 prezintă resetare manuală sau automată, setări de curent ajustabile și compensare ambientală. Releul electronic de suprasarcină Siemens 3RB12/22 oferă unele facilități suplimentare. Releul de suprasarcină SIRIUS

3RB2016-1RBO detectează direct temperatura bobinajului motorului printr-un senzor cu termistor.

4. Releul electronic supracurent LR97D este fabricat de către firma Schneider Electric. El este conceput pentru a proteja pe deplin motoarele electrice și pentru a completa o serie de relee de protecție existente. Motoarele protejate de acest releu acționează de obicei următoarele sarcini mecanice: transportoare, ventilatoare, pompe, centrifuge, prese, ascensoare, mașini-unei.

5. Releul de protecție a motoarelor SEL-710 este realizat la Cluj de către firma EnergoBit.

6. Releul electronic RE09AF este fabricat la Timișoara de către firma EE TEST. Releul electronic RE09AF este destinat supravegherii bunei funcționări și protecției motoarelor electrice trifazate. Aceasta protejează motoarele pentru o gamă largă de evenimente nedorite, permite detectarea și localizarea defecțiunilor în vederea înlăturării rapide a acestora. La cerere releul RE09AF poate supraveghea și motoare cu doar două transformatoare de curent. Maximum 31 de relee RE09AF pot fi legate într-o rețea multipunct RS-485 pentru a fi monitorizate de la un calculator central (cu repetoare de magistrală, numărul releelor poate fi crescut).

Releul este prezentat în figura următoare (fig.2.10).



Figura 2.10. Releu electronic RE09AF

Releul RE09AF protejează motorul la:

1. Suprasarcină, calculând integrala din $(I_{max} = 1,1 I_r)^2 dt$ și având memorie termică;
2. Subsarcină (mers în gol): putem fixa un prag de subcurrent cuprins în intervalul $(20 - 90)\% \times I_r$;
3. Blocaj rotor (limitare de cuplu), cu un prag reglabil $= (2-3) \times I_r$;

4. Asimetrie de curenți, cu un prag reglabil (30-75)%;
5. Lipsă fază;
6. Micșorarea rezistenței de izolație sub $500\text{ K}\Omega$ (motorul nu poate fi pornit);
7. Demaraj prea lung (depășirea timpului de pornire). Releul poate proteja și motoare cu tempi lungi de pornire prin reglajul $td=[2-10]\text{s}$.

După cum spuneam la începutul paginii anterioare, considerațiile de mai sus se vor a fi o prezentare foarte succintă (și evident neexhaustivă) a situației actuale pe plan mondial și în țara noastră a protecției motoarelor electrice asincrone, în particular a protecției motoarelor la întreruperea unei faze. Dar, o primă imagine se poate forma și se poate deduce că progresele tehnice în acest domeniu sunt foarte mari în comparație cu situația din urmă cu 10-15 ani.

CAPITOLUL 3
ARTICOLE PRIVIND PUNTEA DE DIODE
ALIMENTATĂ NESIMETRIC

STUDIUL ANALITIC AL PUNȚII TRIFAZATE DE DIODE ALIMENTATE NESIMETRIC

Vasile Mircea Popa

Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu

Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”

Abstract

The paper proposes an analytical method for calculating the harmonic voltages of a three-phase diode-bridge under non-symmetrical supply conditions. We are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system:

$$u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1), \quad u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \text{ and } u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3).$$

Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x)$, $u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $-\pi/2 < a, b, c < \pi/2$. Performing those calculations we obtain the Fourier coefficients of serial development for direct voltage u_d (there are four cases). All the calculations are conducted only by algebraic calculation with high accuracy.

The analytical equations for the harmonic components of the dc voltages in the proposed method are derived using frequency domain method. The proposed method can be easily extended to the harmonic analysis of three-phase thyristor-bridge with non-symmetrical supply conditions. The validity of the proposed method is demonstrated by comparison with the results of digital simulation.

In the end of the paper we indicate the references.

1. Puntea trifazată de diode alimentată nesimetric

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta o metodă analitică exactă de calcul [1], [2], [3], [4], [5]. Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig.1).

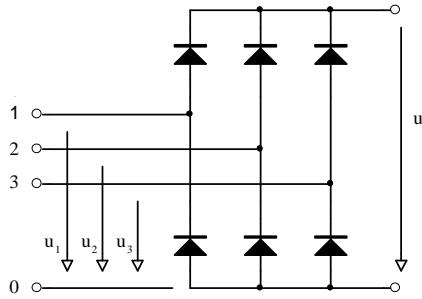


Fig. 1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric.

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3). Tensiunea redresată este u_d .

2. Cazul general. Teorema pozițiilor

Se consideră sistemul trifazat nesimetric general (u_1, u_2, u_3) de secvență directă. Sistemul este nesimetric la modul general, deci prezintă nesimetrie atât de module cât și de unghiuri.

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases} \quad (1)$$

unde am notat $x = \omega t$.

Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$, care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right)$. Mai exact:

- a corespunde la $u_2 \cap u_3$
- b corespunde la $u_3 \cap u_1$
- c corespunde la $u_1 \cap u_2$

Acstea abscise rezultă din următoarele ecuații:

$$u_2(x) = u_3(x); u_3(x) = u_1(x); u_1(x) = u_2(x);$$

Rezolvând aceste ecuații, se obțin următoarele expresii:

$$\begin{aligned} \tan a &= \frac{U_{m2} \sin x_2 - U_{m3} \sin x_3}{U_{m2} \cos x_2 - U_{m3} \cos x_3} \\ \tan b &= \frac{U_{m3} \sin x_3 - U_{m1} \sin x_1}{U_{m3} \cos x_3 - U_{m1} \cos x_1} \\ \tan c &= \frac{U_{m1} \sin x_1 - U_{m2} \sin x_2}{U_{m1} \cos x_1 - U_{m2} \cos x_2} \end{aligned} \quad (2)$$

De aici rezultă imediat a, b, c [3].

Fără a restrânge generalitatea, alegem ca origine de fază mărimea având amplitudinea maximă și fie u_1 această mărime.

Deci $x_1 = 0$; $0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ și $0 < U_{m2} \leq U_{m1}$; $0 < U_{m3} \leq U_{m1}$. În această situație putem lua $U_{m1} = 1$ iar U_{m2} , U_{m3} vor fi numere pozitive subunitare.

Se pot imagina și sisteme trifazate la limită, în care pot interveni unele din următoarele situații: $U_{m2} = 0$; $U_{m3} = 0$; $x_2 = 0$; $x_2 = x_3$; $x_3 = 2\pi$. Aceste sisteme posedă o nesimetrie accentuată.

În aceste condiții (mărimea cu amplitudinea maximă este u_1 și se alege origine de fază) se constată că pot exista 4 cazuri privind poziția relativă a numerelor a, b, c. Vom numi această afirmație teorema pozițiilor.

Teorema pozițiilor poate fi ilustrată prin metoda grafică. Din cele $3! = 6$ situații trebuie să scădem 2 datorită poziției privilegiate a lui u_1 (origine de fază). Demonstrația teoremei pozițiilor este dată în anexele lucrării [3].

Cazurile care pot să existe, după poziția relativă a numerelor a, b, c, sunt următoarele:

Cazul 1: $a < b < c$;

Cazul 2: $a < c < b$;

Cazul 3: $b < c < a$;

Cazul 4: $c < b < a$.

În situații particulare, poate interveni egalitatea între două din numerele a, b, c, de asemenea egalitatea unuia din aceste numere cu $-\frac{\pi}{2}$ sau $+\frac{\pi}{2}$.

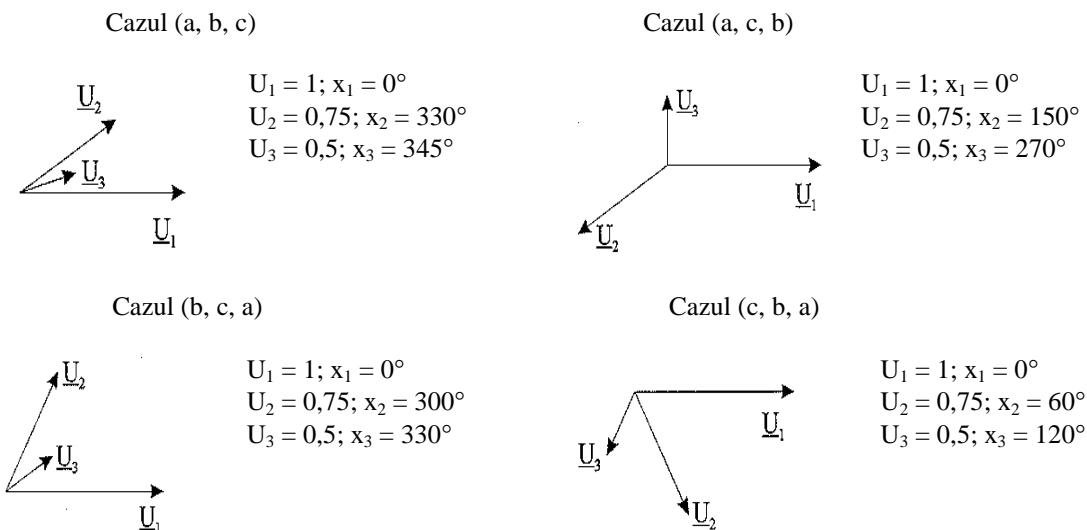


Fig. 2. Exemplificări pentru cele patru cazuri de sisteme nesimetrice.

În figura 2 s-au reprezentat fazorial 4 sisteme la modul general, deci cu nesimetrie atât de module cât și de unghiuri. Sistemele considerate reprezintă cele patru cazuri care pot exista și care au fost prezentate mai înainte.

În toate cazurile, vom nota cu d suma dintre abscisa cea mai mică și numărul π :

$$d = \min(a, b, c) + \pi \quad (3)$$

În fiecare din cazuri, semnalul $u_d(x)$ rezultă periodic cu perioada π [3].

Expresia generală a dezvoltării funcției $u_d(x)$ în serie Fourier este dată de următoarea relație:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n \frac{\pi}{1} x + b_n \sin n \frac{\pi}{1} x \quad (4)$$

unde $2l = \pi$ este perioada [3].

Deci:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos 2nx + b_n \sin 2nx \quad (5)$$

În continuare, vom studia pe rând cele patru cazuri.

3. Cazul 1

Acet caz îl numim pe scurt cazul (a, b, c) .

Audem $a < b < c < d$.

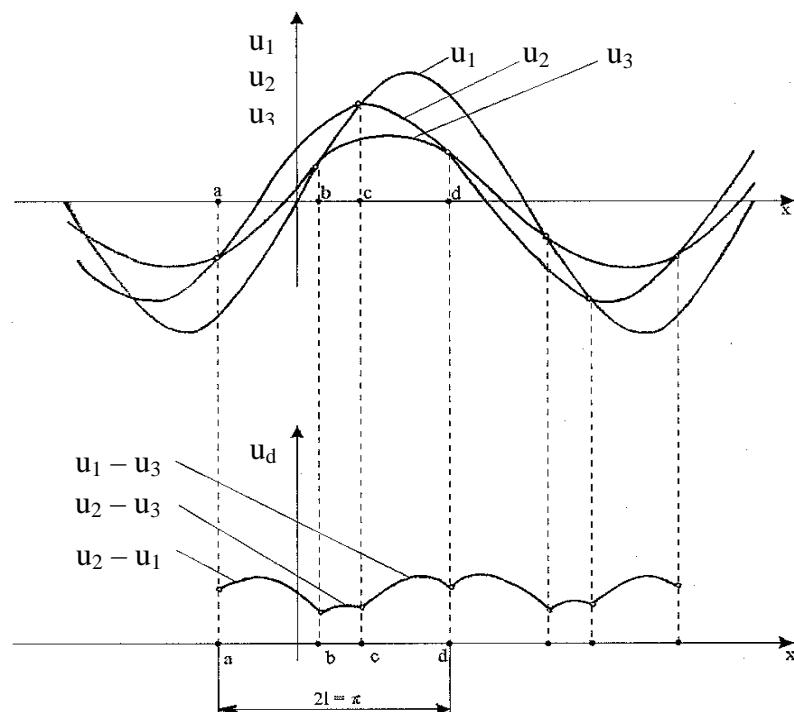


Fig. 3. Sistem nesimetric aparținând cazului 1 și tensiunea u_d corespunzătoare.

În figura 3 s-a prezentat sistemul nesimetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x , precum și tensiunea $u_d(x)$.

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < b \\ u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < d \end{cases} \quad (6)$$

Coeficienții dezvoltării în serie Fourier sunt date de relațiile:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx, \quad a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx, \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx \quad (7)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi a_n = & -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\ & - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\ & - U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\ & + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\ & + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \\ & + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \} \end{aligned} \quad (8)$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi b_n = & -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\ & - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\ & - U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\ & + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\ & + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \} \\ & + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \} \end{aligned} \quad (9)$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned} -\pi a_0 = & -U_{m1} [\cos(b - x_1) + \cos(c - x_1)] - \\ & - U_{m2} [\cos(a - x_2) - \cos(c - x_2)] \\ & + U_{m3} [\cos(a - x_3) + \cos(b - x_3)] \end{aligned} \quad (10)$$

4. Cazurile 2, 3 și 4

Aceste cazuri se studiază asemănător, obținându-se seturile de formule respective [3]. De asemenea, în lucrarea [3] s-au analizat separat cazul sistemului simetric, cazul nesimetriei de module (de amplitudini), cazul nesimetriei de unghiuri (de defazaje), cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate.

S-au considerat și sistemele de secvență inversă.

5. Verificarea rezultatelor obținute

S-a realizat compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică propusă și prin metoda simulării pe calculator. S-au analizat prin ambele metode opt cazuri particulare de alimentare nesimetrică. Rezultatele obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator (PSPICE) sunt apropriate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%. De asemenea, s-au realizat măsurători experimentale utilizând un nanovoltmetru selectiv UNIPAN-tip 233. Valorile măsurate experimental sunt apropriate de cele obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator.

Scopul final al cercetărilor a fost realizarea unui dispozitiv de protecție antibifazică a motoarelor asincrone trifazate, brevetat (brevet nr. 87118), omologat la S.C. „Relee” Mediaș și asimilat în producția de serie.

Note bibliografice

[1] Sakai, M., Fujita, H. – *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings – B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484.

[2] Popa, V. M., Buduriști, C., Garcia Moreno, E. – *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44.

[3] Popa, V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnica, 1999.

[4] Popa, V. M., Roșca, P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Vol. I, pag. 225-228.

[5] Popa, V. M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*; A treia Conferință Națională – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30 mai - 1 iunie 2003, Volumul III, pag. 105-108.

STUDIUL PUNȚII DE DIODE ALIMENTATĂ NESIMETRIC

Vasile Mircea POPA

THE STUDY OF NON-SYMMETRIC FEED DIODE-BRIDGE

In this paper we are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system: $u_k(x) = U_{mk} \sin(x - x_k)$, $k=1,2,3$. Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x), u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $a, b, c \in (-\pi/2, +\pi/2)$. We obtain the Fourier coefficients of a serial development for direct voltage u_d (there are four cases). Based on these relations, we made up a computer program (called the PDIODE program). This program computes and displays: the degree of asymmetry, the degree of disymmetry, the Fourier coefficients a_0, a_n, b_n, A_0 for $n=1, 2, \dots, 10$, the global coefficient of non-symmetry (defined in the paper) and graphical representation for direct voltage u_d spectrum. Are presented obtained results with the computer program.

Cuvinte cheie: punte de diode, alimentare nesimetrică, sistem nesimetric de tensiuni, analiză armonică, grad de asimetrie, grad de disimetrie, coeficient global de nesimetrie.

1. Introducere

În lucrarea [3] s-a dezvoltat o metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric. Se calculează armonicele de tensiune ale unei punți trifazate de diode cu condiții de alimentare nesimetrică. Rezultatele sunt obținute prin calcule algebrice precise. Efectuând calculele, se obțin coeficienții Fourier ai dezvoltării în serie pentru tensiunea continuă u_d (există patru cazuri). Metoda poate fi ușor extinsă pentru analiza armonică a punții trifazate de tiristoare cu condiții de alimentare nesimetrică.

2. Program de calculator PDIODE

Pe baza metodei analitice s-a elaborat un program de calculator (numit **PDIODE**).

Programul elaborat parcurge următoarele etape:

1. Se introduc ca date inițiale parametrii $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, x_1, x_2, x_3$; vom pune întotdeauna $U_{m1} = 1$ și $x_1 = 0$; fazele inițiale se pot exprima în grade sau în radiani (optional).
2. Se calculează U_h, U_d, U_i precum și gradele de asimetrie și disimetrie ϵ_h, ϵ_i , cu ajutorul formulelor cunoscute; acestea vor fi afișate în final.
3. Se calculează numitorii și numărătorii expresiilor pentru calculul numerelor a, b, c ; ei sunt notați $n1, n2, n3$, respectiv $m1, m2, m3$. Dacă cel puțin unul dintre numitorii este zero, se afișează „caz singular de tip 1“ precum și valorile numitorilor. Dacă nu, se calculează numerele a, b, c pe baza relațiilor (3.2).
4. Dacă avem $a = b$ sau $b = c$ sau $c = a$ se afișează „caz singular de tip 2“ precum și valorile lui a, b, c .
5. Dacă nu, se calculează în unul dintre cele 4 cazuri în care ne putem găsi, cu formulele corespunzătoare valorile lui a_0, a_n, b_n , pentru $n = 1, 2, \dots, 10$. De asemenea, se calculează A_n și se afișează lista coeficienților a_0, a_n, b_n, A_n precum și a, b, c .
6. Se afișează coeficientul global de nesimetrie $k_n = A_1 + A_2$.
7. Se afișează reprezentarea grafică a spectrului lui u_d (amplitudinile funcție de ordinul armonicii respective).

Listingul programului **PDIODE** este prezentat în anexele lucrării [3].

3. Rezultate obținute prin utilizarea programului

Ecranul programului **PDIODE** este prezentat în figura 1. S-a considerat sistemul trifazat nesimetric de tensiuni caracterizat de următorii parametri: $U_{m1} = 1, U_{m2} = 0,75, U_{m3} = 0,5; x_1 = 0^\circ, x_2 = 150^\circ, x_3 = 270^\circ$ (care reprezintă cazul acb) aplicat asupra unei punți de diode ideale. S-a obținut analiza armonică a tensiunii u_d (fig.1.a) și reprezentarea spectrului de armonici (fig. 1.b).

PROGRAM PENTRU ANALIZA PUNTII DE DIODE IDEALE ALIMENTATE CU UN SISTEM NESIMETRIC DE TENSIIUNI (PDIODE).

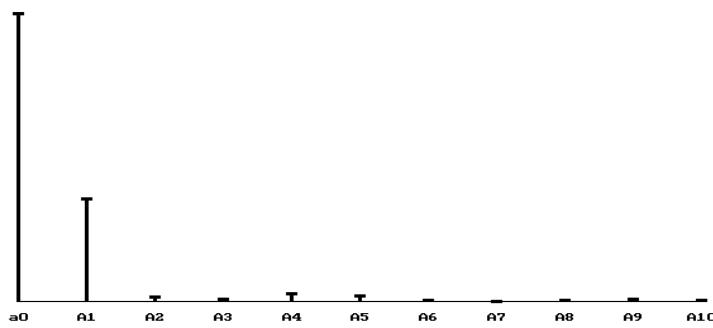
```

Introduceti valorile tensiunilor , Um1,Um2,Um3:1 0.75 0.5
Alegeti exprimarea fazelor in radiani sau grade [r/g]:g
Introduceti valorile fazelor initiale , x1,x2,x3:0 150 270
a=-9.3223663069E-01 b= 4.6364760900E-01 c =-2.2353961103E-01
Sintem in cazul : acb
a0= 1.2412070235E+00
a1=-3.9910117761E-01 b1= 1.8673781197E-01 a1= 4.4062768909E-01
a2= 6.8289869380E-03 b2=-1.5205778986E-02 a2= 1.6668856505E-02
a3=-3.2567712774E-03 b3= 1.0190115325E-02 a3= 1.0697897433E-02
a4= 8.9668533640E-03 b4= 3.2923918075E-02 a4= 3.4123142304E-02
a5= 1.4224891016E-02 b5= 1.6647888970E-02 a5= 2.1745817436E-02
a6= 2.0848083423E-03 b6= 1.8542852677E-03 a6= 2.7901253876E-03
a7=-1.1967117158E-03 b7= 9.7157456710E-04 a7= 1.5414525845E-03
a8= 4.5626173602E-03 b8=-2.3736831050E-03 a8= 5.1431360724E-03
a9= 4.1860762919E-03 b9=-6.4031959158E-03 a9= 7.6501080161E-03
a10= 7.0674286465E-04 b10=-3.2440767011E-03 a10= 3.3201685378E-03
Coeficientul global de nesimetrie kn= 4.5729654559E-01
epsilon_h= 1.7113799853E-01 epsilon_i= 3.4768005591E-01

```

a)

acb



b)

Fig.1 Ecranul programului PDIODE (a – analiza armonică, b – spectrul)

S-au analizat și alte cazuri particulare de alimentare nesimetrică. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**, bazat pe metoda analitică) și prin metoda simulării pe calculator (**PSPICE**) sunt apropriate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%.

Pentru modelarea și simularea pe calculator a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având ca sarcină o rezistență pură, am utilizat produsul soft **PSPICE** al firmei MicroSim Corporation (SUA). În lucrarea [3] s-a prezentat detaliat numai analiza Fourier pentru mărimea u_d . Mai exact, s-au prezentat într-un tabel rezultatele obținute cu metoda analitică și cu metoda simulării **PSPICE** pentru componenta continuă și primele patru armonici, precum și o comparație între aceste rezultate.

De asemenea, s-au măsurat experimental armonicile tensiunii u_d în cazurile următoare: cazul sistemului simetric, cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate. S-a utilizat un nanovoltmetru selectiv UNIPAN tip 233 (Polonia) cu următoarele date tehnice principale: intrare – 1 μ V ... 100mV; divizor al tensiunii de intrare – 1:1000; frecvență – 1,5 ... 150kHz; selectivitate – 0; 18; 36; 54 dB/octavă.

Tensiunea u_d a fost vizualizată cu ajutorul unui osciloscop HAMEG-HM 203, 20 MHz (Germania).

Datele experimentale au fost obținute pornind de la situația inițială $U_{m1}=U_{m2}=U_{m3}=24V$.

Valorile măsurate experimental sunt apropriate de acelea obținute prin simulare **PSPICE** (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea s-a făcut analiza armonică a tensiunii u_d , folosind aparatul RFT-Sichtgerat SG1 (Germania). Rezultatele obținute coincid practic cu cele obținute utilizând nanovoltmetrul selectiv.

În concluzie, rezultatele deduse prin metoda analitică, cu ajutorul programului de calculator **PDIODE** (bazat pe metoda analitică), prin simulare pe calculator (**PSPICE**) și prin măsurători experimentale sunt apropriate, ceea ce certifică atât datele obținute cât și metodele utilizate în acest scop.

BIBLIOGRAFIE:

- [1] Sakui, M., Fujita, H. – *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings – B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484.
- [2] Popa, V.M., Buduriști, C., Garcia Moreno, E. – *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44.
- [3] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnica, 1999.

STUDIUL PUNȚII DE DIODE ALIMENTATĂ CU SISTEME PARTICULARARE NESIMETRICE DE TENSIUNI

Vasile Mircea POPA, Lizeta POPESCU

Abstract. Study of Diode-Bridge Fed by Particular Non-Symmetrical Voltage Systems.

In this paper we are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system: $u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1)$, $u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2)$ and $u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3)$. Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x)$, $u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $a, b, c \in (-\pi/2, \pi/2)$. More precise, a corresponds to $u_2 \cap u_3$, b corresponds to $u_3 \cap u_1$ and c corresponds to $u_1 \cap u_2$. The diode-bridge gives an output voltage that is periodic, but non-sinusoidal. We obtain the Fourier coefficients of a serial development for direct voltage u_d (there are four cases). We also propose a non-symmetry total coefficient that characterizes the non-symmetry of a three-phase system applicable about diode-bridge: $k_n = (A_1 + A_2)/U_{m1}$, where A_1 is the amplitude of the first harmonic and A_2 is the amplitude of the second harmonic.

The paper proposes an analytical method for calculating the harmonic voltages of a three-phase diode-bridge under particular non-symmetrical supply conditions. All the calculations are conducted only by algebraic calculation with high accuracy. By performing those calculations we obtain the Fourier coefficients of serial development for direct voltage u_d and the non-symmetry total coefficients for four cases.

The analytical equations for the harmonic components of the dc voltage in the proposed method are derived using the frequency domain method and the rectifier switching functions.

To demonstrate the usefulness of the proposed method, the results obtained by the proposed method are compared with those obtained by the simulation method, which gives very accurate results. Comparisons between the basic analytical model and the digital simulation results are given to validate the analysis.

1. Introducere

În lucrările [3], [4] s-a considerat cazul general al unei punți de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig. 1).

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases} \quad (1)$$

Puntea de diode are ca sarcină un receptor pur rezistiv. Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x)$, $u_2(x)$, $u_3(x)$ care se găsesc în intervalul $(-\pi/2, \pi/2)$.

În lucrările menționate anterior [3], [4] s-a dezvoltat o metodă analitică pentru calculul armonicilor tensiunii redresate u_d (există patru cazuri). S-au obținut formulele generale pentru coeficienții seriei Fourier.

De asemenea, s-a definit un coeficient global de nesimetrie (CGN) care caracterizează nesimetria sistemului trifazat aplicat asupra punții de diode.

Acesta este:

$$k_n = \frac{A_1 + A_2}{U_{m1}} \quad (2)$$

unde A_1 este amplitudinea armonică de ordinul 1 iar A_2 este amplitudinea armonică de ordinul 2 din tensiunea u_d . Numitorul U_{m1} reprezintă valoarea maximă a tensiunii pe faza întâi. Se poate considera $U_{m1} = 1$, iar U_{m2} , U_{m3} numere pozitive subunitare. În acest fel, fiecărui sistem trifazat nesimetric i se atașază o valoare a coeficientului global de nesimetrie cuprinsă între 0 (pentru sistemul simetric) și 1,018 (pentru sistemul monofazat).

2. Sisteme particulare nesimetrice de tensiuni

Considerăm următoarele sisteme:

a) Cazul sistemului simetric.

Acesta este un caz particular (limită).

Aveam:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m \quad (3)$$

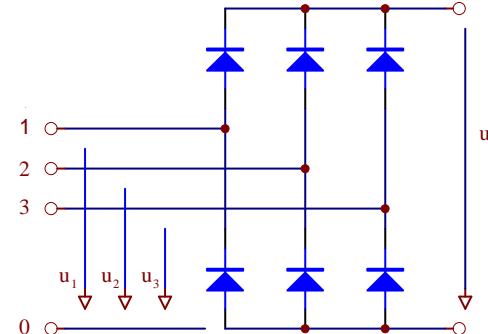


Fig. 1. Punte de diode ideale alimentată nesimetric

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (4)$$

b) Cazul nesimetriei de module (de amplitudini):

$$U_{m1} \neq U_{m2} \neq U_{m3} \quad (5)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (6)$$

c) Cazul nesimetriei de unghiuri (de defazaje):

$$x_1 = 0; \quad x_2 \neq \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 \neq \frac{4\pi}{3} \quad (7)$$

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m \quad (8)$$

d) Cazul anulării unei tensiuni:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m; \quad U_{m3} = 0 \quad (9)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (10)$$

e) Cazul anulării a două tensiuni:

$$U_{m1} = U_m; \quad U_{m2} = U_{m3} = 0 \quad (11)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (12)$$

f) Cazul funcționării monofazate:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m; \quad U_{m3} = 0 \quad (13)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \pi; \quad x_3 = \text{oarecare} \quad (14)$$

Particularizând formulele generale deduse în lucrările [3], [4] se obțin rezultatele particulare respective. Pentru verificare, abordând direct aceste cazuri, se regăsesc aceleași rezultate.

În lucrarea de față prezentăm numai rezultatele obținute în cazurile sistemelor (a) și (f).

a) Cazul sistemului simetric:

$$u_d(x) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} + \frac{6\sqrt{3}U_m}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{36k^2 - 1} \cos 6kx \quad (15)$$

$$k_n = 0 \quad (16)$$

f) Cazul sistemului monofazat:

$$u_d(x) = \frac{4U_m}{\pi} - \frac{8U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\pi}{4n^2 - 1} \quad (17)$$

$$k_n = \frac{48}{15\pi} \approx 1,018 \quad (18)$$

3.Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator

S-au analizat prin ambele metode opt cazuri particulare care sunt prezentate în continuare, cu notațiile de la modelarea PSPICE.

1. Cazul sistemului simetric:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-120°
V3	100 V	-240°

2. Cazul sistemului nesimetric (anularea unei tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-120°
V3	0 V	-240°

3.Cazul sistemului nesimetric (anularea a două tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	0 V	-120°

V3	0 V	–240°
----	-----	-------

4. Cazul sistemului nesimetric (funcționare monofazată)

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	–180°
V3	0 V	0°

5. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	–330°
V3	50 V	–345°

6. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	–150°
V3	50 V	–270°

7. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	–300°
V3	50 V	–330°

8. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	–60°
V3	50 V	–120°

Rezultatele obținute sunt trecute în tabelul 1.

Tabelul 1

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru V (4,5)	Metoda analitică (programul PDIODE) (V)	Metoda simulării pe calculator (PSPICE) (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a ₀	165,3	163,3	–1,2
	100	A ₁	–	–	–
	200	A ₂	–	–	–
	300	A ₃	9,5	9,5	–
	400	A ₄	–	–	–
Sistemul 2 (V ₃ = 0)	0	a ₀	118,7	116,8	–1,6
	100	A ₁	57,9	57,3	–1
	200	A ₂	3,1	3,1	–
	300	A ₃	0,5	0,49	–2
	400	A ₄	0,73	0,72	–1,3
Sistemul 3 (V ₃ = 0, V ₂ = 0)	0	a ₀	63,8	61,9	–2,9
	100	A ₁	42,4	41,8	–1,4
	200	A ₂	8,5	8,4	–1,1
	300	A ₃	3,6	3,5	–2,8
	400	A ₄	2,02	1,96	2,9

Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	127,3	125,3	-1,5
	100	A_1	84,8	83,7	-1,2
	200	A_2	16,9	16,4	-2,9
	300	A_3	7,2	7,0	-2,7
	400	A_4	4,04	3,95	-2,2
Sistemul 5 (caz (a,b,c))	0	a_0	42,7	41,9	-1,8
	100	A_1	12,4	12,3	-0,8
	200	A_2	3,05	2,97	-2,6
	300	A_3	0,82	0,8	-2,4
	400	A_4	0,45	0,44	-2,2
Sistemul 6 (caz (a,c,b))	0	a_0	124,1	122,2	-1,5
	100	A_1	44,0	43,5	-1,1
	200	A_2	1,66	1,62	-2,4
	300	A_3	1,07	1,10	2,8
	400	A_4	3,41	3,31	-2,9
Sistemul 7 (caz (b,c,a))	0	a_0	61,2	59,5	-2,7
	100	A_1	31,2	30,8	-1,2
	200	A_2	2,96	2,89	-2,3
	300	A_3	1,24	1,21	-2,4
	400	A_4	0,56	0,55	-1,7
Sistemul 8 (caz (c,b,a))	0	a_0	91,8	89,9	-2,0
	100	A_1	42,6	42,1	-1,1
	200	A_2	3,05	2,98	-2,2
	300	A_3	1,42	1,38	-2,8
	400	A_4	0,99	1,01	-2,0

Rezultatele obținute prin metoda analitică în cazul sistemelor nesimetrice particulare arătate mai sus au fost comparate cu cele obținute prin metoda simulării pe calculator (PSPICE). Aceste rezultate sunt apropriate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%, după cum se observă din tabel.

Bibliografie

1. Sakai M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
2. Popa V. M., Buduriști, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
3. Popa V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnica, 1999
4. Popa V. M., Roșca P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228
5. Popa V. M., Roșca P. – *Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 229-230

ASPECTE EXPERIMENTALE ȘI SINTETICE PRIVIND PUNTEA TRIFAZATĂ DE DIODE ALIMENTATĂ NESIMETRIC

Vasile Mircea Popa

Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu

Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”

Abstract

In the paper is considered a three-phase diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system. The paper presents in the first part a complete modeling using the PSPICE computer package concerning a non-symmetrical supplied diode-bridge.

In the second part, experimental measurements and a synthetical aspects regarding diode-bridge are presented. For making a test of the measurement precision, the results obtained from the experimental measurements are compared with those obtained with the simulation method, using the PSPICE environments. Experimental measured values are near to those obtained by using digital simulation (maximum relative error: 0,9%).

At the end of the paper we indicate the references.

1. Introducere

În lucrările [3], [4], [9] s-a considerat cazul general al unei punți de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni. Puntea de diode are ca sarcină un receptor pur rezistiv. În lucrările menționate anterior s-a dezvoltat o metodă analitică pentru calculul armonicilor tensiunii redresate u_d (există patru cazuri). S-au obținut formulele generale pentru coeficienții seriei Fourier.

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta pe scurt metoda analitică exactă de calcul amintită anterior și apoi se prezintă rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate, comparate cu cele obținute prin modelare și simulare PSPICE.

Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig.1).

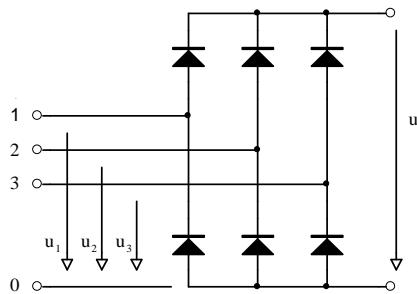


Fig. 1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric.

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3). Tensiunea redresată este u_d .

2. Metoda analitică

În lucrările [3], [4], [9] s-a prezentat o metodă analitică pentru calculul spectrului de armonici al tensiunii redresate u_d . S-au considerat expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$ și s-au determinat abscisele punctelor de intersecție ale acestor curbe care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$. Aceste abscise s-au notat cu a, b, c . Se constată că există patru cazuri privind poziția relativă a numerelor a, b, c , afirmație care a fost numită teorema pozițiilor. În fiecare din cele patru cazuri, tensiunea $u_d(x)$ rezultă periodică cu perioada π . S-a considerat dezvoltarea funcției $u_d(x)$ în serie Fourier și s-au obținut expresiile analitice ale coeficienților dezvoltării a_0, a_n, b_n în cele patru cazuri. S-au analizat prin metoda analitică și o serie de cazuri particolare ale sistemului de alimentare. Pe baza metodei analitice s-a elaborat un program de calculator (numit PDIODE), care realizează analiza armonică a tensiunii u_d pentru diverse sisteme trifazate de alimentare ale punții.

3. Metoda simulării pe calculator

Pentru modelarea și simularea pe calculator a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având ca sarcină o rezistență pură, am utilizat produsul soft PSPICE al firmei MicroSim Corporation (SUA). În

figura 2 este prezentată schema electrică a unei punți trifazate de diode, cu numerotarea corespunzătoare a nodurilor.

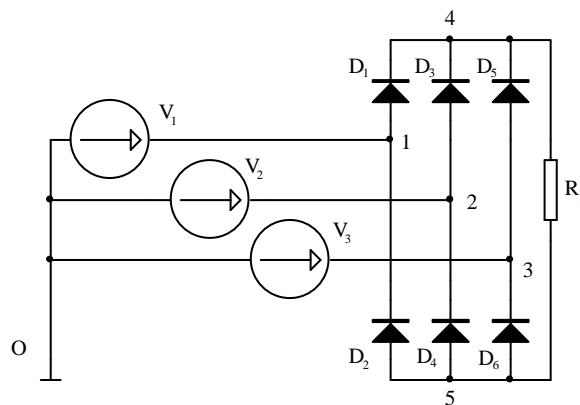


Fig. 2 Puntea de diode pentru modelarea PSPICE

Fiecare dintre tensiunile V_1 , V_2 , V_3 au fost generate în cadrul programului PSPICE folosind instrucțiunea pentru specificarea surselor de tensiune sinusoidală SIN.

Sintaxa acestei instrucțiuni este:

$\text{SIN}(<\text{vo}><\text{va}><\text{f}><\text{td}><\text{df}><\text{faza}>)$

și poate defini pe cazul cel mai general un semnal sinusoidal amortizat.

Explicitarea parametrilor din instrucțiunea de mai sus este redată în tabelul următor.

Tabelul 1

Parametri	Valoarea implicită	Unitate
vo – tensiunea de offset	–	volt
va – amplitudinea	–	volt
f – frecvența	1/TSTOP	hertz
td – întârzierea	0	secunde
df – factor de amortizare	0	secunde
faza – defazajul semnalului	0	grade

Am folosit $\text{vo} = 0$, $\text{td} = 0$, $\text{df} = 0$.

Utilizăm diode pentru care sunt specificați în cadrul instrucțiunii MODEL parametru de model: IS (currentul de saturatie al juncțiunii) și BV (tensiunea de străpungere a juncțiunii).

S-a utilizat modelul de diodă: MODEL DI D($\text{IS} = 2e - 15$ $\text{BV} = 1000$). Rezistența de sarcină R_1 are valoarea $1 \text{ k}\Omega$.

Folosind modelul de punte prezentat mai sus, s-a făcut analiza PSPICE pentru mai multe cazuri, rezultându-se următoarele: analiza tranzistorie (cu pasul 5 ms) pentru mărimele $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$; reprezentarea funcției de timp a mărimerilor $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$, pe intervalul 0...40 ms; analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5)$; reprezentarea spectrului de armonici pentru mărimea $V(4,5)$.

Rezultatele obținute în urma analizei cu programul PSPICE concordă cu rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul PDIODE care are la bază această metodă).

În continuare vom prezenta detaliat numai analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5) = u_d$. În unele lucrări anterioare [3], [4], [9] s-au prezentat rezultatele obținute cu metoda analitică și cu metoda simulării PSPICE pentru componenta continuă și primele patru armonici, precum și o comparație între aceste rezultate. În cazul simulării PSPICE, amplitudinea tensiunii maxime $V(1)$ este de 100 V și prin urmare rezultatele metodei analitice au fost amplificate de 100 de ori pentru a fi comparate cu acelea de la analiza Fourier, unde s-a considerat $U_{m1} = 100$ V. Prin alegerea acestei tensiuni de 100 V s-a urmărit reducerea erorii produse de căderea de tensiune pe diode în conducție directă (de cca. 0,8 V). Frecvența centrală a analizei Fourier a fost de 50 Hz.

4. Măsurători experimentale

Pentru verificarea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator s-au măsurat experimental armonicile tensiunii u_d în cazurile următoare: cazul sistemului simetric, cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate.

S-a utilizat un nanovoltmetru selectiv UNIPAN-tip 233 (Polonia) cu următoarele date tehnice principale: intrare: $1\mu V \dots 100$ mV; divizor al tensiunii de intrare: 1 : 1000; frecvență: 1,5 ... 150 kHz; selectivitate: 0; 18; 36; 54 dB/octavă.

Tensiunea u_d a fost vizualizată cu ajutorul unui osciloscop HAMEG-HM 203, 20 Mhz (Germania).

S-au obținut următoarele date experimentale, pornind de la situația inițială $U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = 24$ V:

Tabelul 2

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componența Fourier pentru u_d	Valori măsurate experimental (V)	Valori obținute prin simulare PSPICE (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a_0	39,3	39,2	0,2
	300	A_3	2,26	2,28	-0,8
	600	A_6	0,480	0,484	-0,8
Sistemul 2 ($u_3 = 0$)	0	a_0	28,1	28	0,3
	100	A_1	13,7	13,75	-0,4
	200	A_2	0,745	0,750	-0,6
Sistemul 3 ($u_3 = 0$, $u_2 = 0$)	0	a_0	14,9	14,8	0,6
	100	A_1	9,95	10	-0,5
	200	A_2	1,99	2,01	-0,9
	300	A_3	0,81	0,815	-0,6

Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	30,16	30,1	0,2
	100	A_1	20,15	20	0,7
	200	A_2	3,9	3,93	-0,7
	300	A_3	1,67	1,68	-0,6

Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acele obținute prin simulare PSPICE (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea s-a făcut analiza armonică a tensiunii u_d , folosind aparatul RFT-Sichtgerat SG1 (Germania). Rezultatele obținute coincid practic cu acele din tabelul 1.

5. Concluzii

În legătură cu puntea trifazată de diode alimentată nesimetric, s-au realizat o serie de cercetări, prezentate în lucrările arătate în lista bibliografică. S-a elaborat o metodă analitică exactă pentru calculul armonicilor tensiunii redresate (există patru cazuri pentru prezentarea formulelor generale). De asemenea, s-au analizat prin metoda analitică şase situaţii particulare de sisteme trifazate de tensiuni de alimentare. S-a realizat apoi simularea pe calculator folosind mediul PSPICE. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv prin programul de calculator PDIODE, bazat pe metoda analitică) în cazul a opt sisteme nesimetrice particulare au fost comparate cu cele obținute prin metoda simulării pe calculator (PSPICE). Aceste rezultate sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%.

S-au făcut și măsurători experimentale, măsurând armonicile tensiunii u_d cu ajutorul unui nanovoltmetru selectiv UNIPAN tip 233 (Polonia). Aceste măsurători s-au realizat pentru patru sisteme particulare de tensiuni, arătate în lucrarea de față. Valorile măsurate experimental ale amplitudinilor armonicilor sunt apropiate de cele obținute prin simulare PSPICE (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea, s-a introdus un coeficient global de nesimetrie și s-a realizat o aplicație tehnică a caracterizării nesimetriei unui sistem trifazat prin coeficientul global de nesimetrie (CGN). Este vorba de un releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la intreruperea unei faze de alimentare, care a fost brevetat (brevet OSIM nr. 87118). S-a realizat un model experimental care a fost testat pe standul pentru încercarea motoarelor electrice, stand care a fost construit prin autodotare în laboratorul de electrotehnica [3].

Proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică s-a realizat în cadrul unui contract de cercetare-proiectare încheiat cu întreprinderea S.C. „RELEE” S.A. Mediaș [3]. Dispozitivul de protecție antibifazică a fost omologat la S.C. „RELEE” S.A. Mediaș și a fost asimilat în producția de serie, existând posibilitatea producerii lui funcție de cerințele beneficiarilor din industrie.

Note bibliografice

- [1] Sakai M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol. 139, No.5, September 1992, pp.478-484
- [2] Popa V. M., Buduriști, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
- [3] Popa V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnica, 1999
- [4] Popa V. M., Roșca P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228
- [5] Popa V. M., Roșca P. – *Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 229-230
- [6] Popa, V. M., Popescu, L. – *Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIEMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.173-176
- [7] Popa, V. M., Popescu, L. – *Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIEMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.165-166
- [8] Popa, V. M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag.105-108
- [9] Popa, V. M. – *Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric*, A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Română Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag.199-204
- [10] Popa, V. M. – *Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice*, Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4, pag.309-314

VASILE MIRCEA POPA

COEFICIENT GLOBAL DE NESIMETRIE PENTRU SISTEME TRIFAZATE

Prof. dr. ing. Vasile Mircea Popa
 Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
 Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”
 Telefon: 0269-216062 – int. 481
 Fax: 0269-212716
 E-mail: popavm@yahoo.com

Rezumat

În lucrarea de față se prezintă un coeficient global de nesimetrie pentru caracterizarea nesimetriei sistemelor trifazate de tensiuni și curenți. Se analizează puntea de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni, printr-o metodă analitică exactă. Se definește în continuare coeficientul global de nesimetrie. Se prezintă apoi un program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (**VARK**). În final se arată unele concluzii și observații.

Abstract

This paper presents a global coefficient of non-symmetry for characterizing the non-symmetry of three-phased voltage and current systems. Through an accurate analytical method, we analyse the diode-bridge under non-symmetrical supply conditions. Then we define the global coefficient of non-symmetry. We also present a computer program for representing the variation of the global coefficient of non-symmetry (**VARK**). Finally, we draw the conclusions and make some observations.

Cuvinte cheie (descriptori): sistem trifazat nesimetric, grad de asimetrie, grad de disimetrie, punte de diode, alimentare nesimetrică, analiză armonică, coeficient global de nesimetrie.

1. Introducere

Unul din aspectele importante ale îmbunătățirii calității energiei electrice la consumatorii trifazați este compensarea dezechilibrului acestora. Această compensare are mari avantaje tehnice și economice, fiind o problemă complexă sub aspect teoretic și practic. În general, problema trebuie rezolvată în corelare cu necesitatea compensării și a armonicilor superioare și a îmbunătățirii factorului de putere [4], [7], [12].

Pentru analiza și caracterizarea sistemelor trifazate nesimetrice sunt utilizate în electrotehnică componente simetrice precum și sistemul de componente ($\alpha, \beta, 0$) [3], [11].

Teoria coordonatelor (componentelor) simetrice a fost introdusă în electrotehnică de către Stokvis (1915) și Fortescue (1918). Ea se bazează pe ideea descompunerii unui sistem trifazat nesimetric în trei sisteme simetrice: sistemul direct, sistemul invers și sistemul homopolar. Teorema Stokvis - Fortescue ne asigură că o astfel de descompunere este întotdeauna posibilă și este unică. [1], [6], [10], [11].

Nesimetria unui sistem trifazat ($\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$) este apreciată cu ajutorul gradului de disimetrie și al gradului de asimetrie:

$$\varepsilon_i = \frac{U_i}{U_d}; \quad \varepsilon_h = \frac{U_h}{U_d}$$

În electrotehnică, un sistem trifazat este considerat simetric dacă atât gradul de disimetrie cât și gradul de asimetrie sunt mai mici decât 0,05 [11]. Gradul de disimetrie (asimetrie) mai este denumit uneori factor de disimetrie (asimetrie).

Gradul de disimetrie mai este denumit coeficient de nesimetrie inversă, iar gradul de asimetrie, coeficient de nesimetrie homopolară.

Ambele aceste mărimi sunt cuprinse în cadrul normelor internaționale.

O extindere a acestor noțiuni este făcută în lucrarea [5]. Astfel se definesc gradul de disimetrie complex și gradul de asimetrie complex:

$$\underline{\xi}_i = \frac{\underline{U}_i}{\underline{U}_d} = \xi_i e^{j\theta_i}; \underline{\xi}_h = \frac{\underline{U}_h}{\underline{U}_d} = \xi_h e^{j\theta_h}.$$

unde θ_i este unghiul dintre \underline{U}_i și \underline{U}_d iar θ_h este unghiul dintre \underline{U}_h și \underline{U}_d . În aceeași lucrare sunt indicate metode pentru determinarea acestor coeficienți și pentru măsurarea componentelor simetrice.

Pentru caracterizarea gradului de nesimetrie introdus în rețele electrice de consumatori dezechilibrați s-au propus în lucrarea [4] următorii indicatori:

$$k_P = \frac{P_n}{P_s}; k_Q = \frac{Q_n}{Q_s}.$$

unde P_n este puterea activă de nesimetrie: $P_n = P_h + P_i$, iar P_s este puterea activă de simetrie: $P_s = P_d$.

Asemănător pentru puterea reactivă:

$$Q_n = Q_h + Q_i; Q_s = Q_d.$$

Acești indicatori se numesc rapoarte de nesimetrie.

Pentru caracterizarea nesimetriei sistemelor trifazate de tensiuni și de curenți ce apar în circuitele trifazate dezechilibrate se propune în lucrarea de față un coeficient global de nesimetrie.

2. Puntea de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta o metodă analitică exactă de calcul, o metodă de simulare pe calculator și o comparație între rezultatele obținute prin cele două metode [7], [8], [9].

Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

De asemenea, vom prezenta rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate în laborator.

2.1 Metoda analitică

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig. 1).

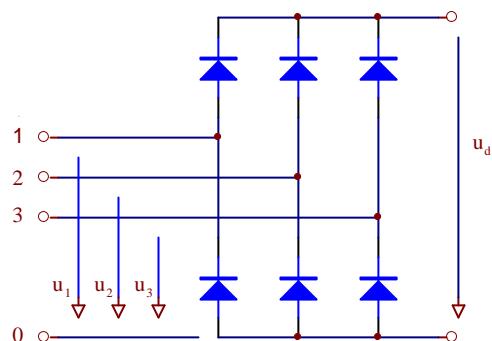


Fig. 1 Puntea de diode ideale alimentată nesimetric

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3) . Tensiunea redresată este u_d .

2.1.1 Considerarea cazului general. Teorema pozițiilor

Se consideră sistemul trifazat nesimetric general (u_1, u_2, u_3) de secvență directă. Sistemul este nesimetric la modul general, deci prezintă nesimetrie atât de module cât și de unghiuri.

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases}$$

unde am notat $x = \omega t$ [6], [10], [11].

Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$, care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right)$. Mai exact:

- a corespunde la $u_2 \cap u_3$; - b corespunde la $u_3 \cap u_1$; - c corespunde la $u_1 \cap u_2$

Aceste abscise rezultă din următoarele ecuații:

$$u_2(x) = u_3(x); \quad u_3(x) = u_1(x); \quad u_1(x) = u_2(x);$$

Rezolvând aceste ecuații, se obțin următoarele expresii:

$$\tan a = \frac{U_{m2} \sin x_2 - U_{m3} \sin x_3}{U_{m2} \cos x_2 - U_{m3} \cos x_3}; \quad \tan b = \frac{U_{m3} \sin x_3 - U_{m1} \sin x_1}{U_{m3} \cos x_3 - U_{m1} \cos x_1}; \quad \tan c = \frac{U_{m1} \sin x_1 - U_{m2} \sin x_2}{U_{m1} \cos x_1 - U_{m2} \cos x_2}$$

De aici rezultă imediat a, b, c [7].

Fără a restrânge generalitatea, alegem ca origine de fază mărimea având amplitudinea maximă și fie u_1 această mărime.

Deci $x_1 = 0; 0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ și $0 < U_{m2} \leq U_{m1}; 0 < U_{m3} \leq U_{m1}$. În această situație putem lua $U_{m1} = 1$ iar U_{m2}, U_{m3} vor fi numere pozitive subunitare.

Se pot imagina și sisteme trifazate la limită, în care pot interveni unele din următoarele situații:

$U_{m2} = 0; U_{m3} = 0; x_2 = 0; x_2 = x_3; x_3 = 2\pi$. Aceste sisteme posedă o nesimetrie accentuată.

În aceste condiții (mărimea cu amplitudinea maximă este u_1 și se alege origine de fază) se constată că pot exista 4 cazuri privind poziția relativă a numerelor a, b, c. Vom numi această afirmație teorema pozițiilor.

Teorema pozițiilor poate fi ilustrată prin metoda grafică. Din cele $3! = 6$ situații trebuie să scădem 2 datorită poziției privilegiate a lui u_1 (origine de fază). Demonstrația teoremei pozițiilor este dată în anexele lucrării [7].

Cazurile care pot să existe, după poziția relativă a numerelor a, b, c, sunt următoarele:

Cazul 1: $a < b < c$; cazul 2: $a < c < b$; cazul 3: $b < c < a$; cazul 4: $c < b < a$.

În situații particulare, poate interveni egalitatea între două din numerele a, b, c, de asemenea egalitatea unuia din aceste numere cu $-\frac{\pi}{2}$ sau $+\frac{\pi}{2}$.

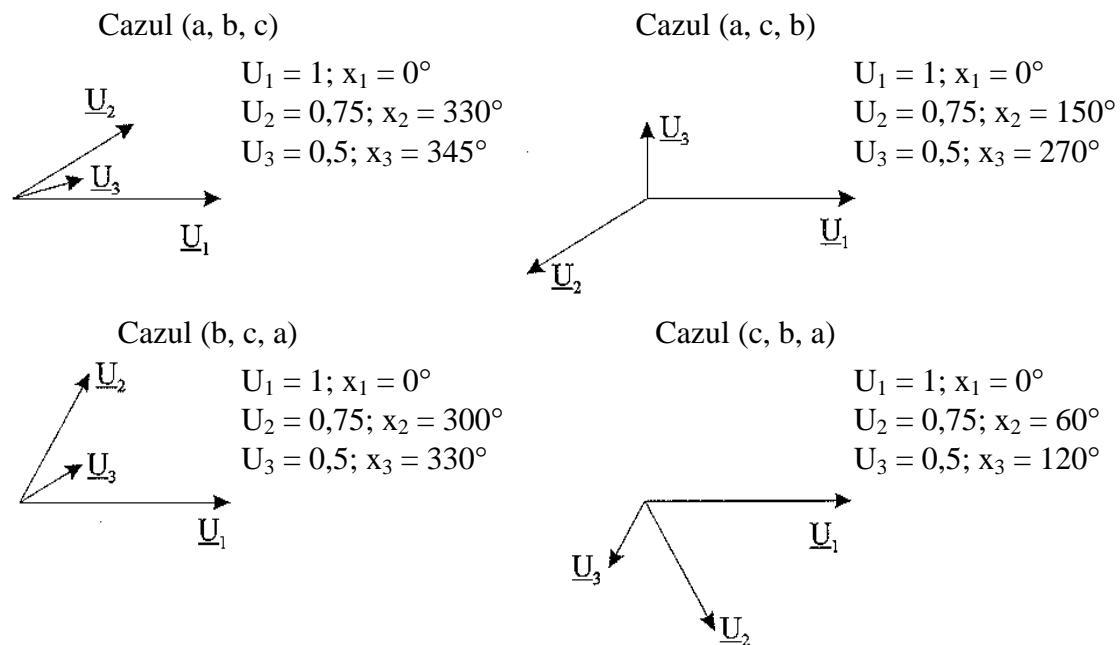


Fig. 2 Exemplificări pentru cele patru cazuri de sisteme nesimetrice

În figura 2 s-au reprezentat factorial 4 sisteme la modul general, deci cu nesimetrie atât de module cât și de unghiuri. Sistemele considerate reprezintă cele patru cazuri care pot exista și care au fost prezentate mai înainte.

În toate cazurile, vom nota cu d suma dintre abscisa cea mai mică și numărul π :

$$d = \min(a, b, c) + \pi$$

În fiecare din cele 4 cazuri, semnalul $u_d(x)$ rezultă periodic cu perioada π [7].

Expresia generală a dezvoltării funcției $u_d(x)$ în serie Fourier este dată de următoarea relație:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n \frac{\pi}{1} x + b_n \sin n \frac{\pi}{1} x \quad (1)$$

unde $2l = \pi$ este perioada. [6], [10], [11].

Deci: $u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos 2nx + b_n \sin 2nx$ (2)

În continuare, vom studia pe rând cele patru cazuri.

2.1.2 Cazul I

Acest caz îl numim pe scurt cazul (a, b, c).

Avem $a < b < c < d$.

În figura 3 se prezintă sistemul nesimetric (u_1 , u_2 , u_3) funcție de x, precum și tensiunea $u_d(x)$.

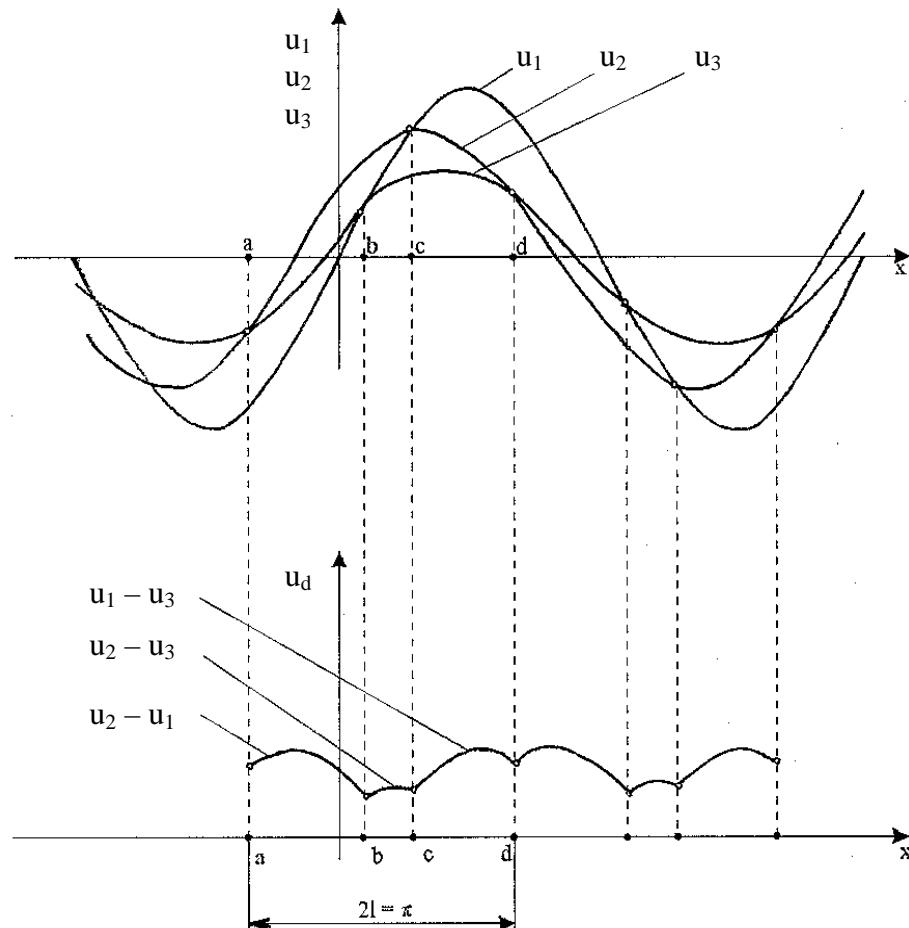


Fig. 3 Sistem nesimetric aparținând cazului 1 și tensiunea u_d corespunzătoare

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < b \\ u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < d \end{cases} \quad (3)$$

Coefficienții dezvoltării în serie Fourier sunt date de relațiile:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx ; a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx ; b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx . \quad (4)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .
Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned}
& (4n^2 - 1) \pi a_n = \\
& = -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\
& - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\
& - U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\
& + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \}
\end{aligned} \tag{5}$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned}
& (4n^2 - 1) \pi b_n = \\
& = -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\
& - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\
& - U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\
& + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \}
\end{aligned} \tag{6}$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
& -\pi a_0 = \\
& = -U_{m1} [\cos(b - x_1) + \cos(c - x_1)] - \\
& - U_{m2} [\cos(a - x_2) - \cos(c - x_2)] \\
& + U_{m3} [\cos(a - x_3) + \cos(b - x_3)]
\end{aligned} \tag{7}$$

2.1.3 Cazurile II, III și IV

Aceste cazuri se tratează asemănător cazului I, obținându-se seturile de formule respective [7].

2.1.4 Cazul sistemului simetric

În acest caz particular (caz limită) avem:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m; \quad x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3}$$

Particularizând formulele generale (sau abordând direct acest caz) obținem:

$$b_n = 0 \text{ (pentru orice } n). \tag{8}$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}(-1)^{k+1}U_m}{\pi(36k^2 - 1)}, & \text{pentru } n = 3k \\ 0, & \text{pentru } n = 3k - 1 \\ 0, & \text{pentru } n = 3k - 2 \end{cases} \tag{9}$$

$$\text{unde } k \geq 1. \quad a_0 = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi}. \tag{10}$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} + \frac{6\sqrt{3}U_m}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{36k^2 - 1} \cos 6kx \tag{11}$$

Se observă că amplitudinea armonicii corespunde lui $n = 1$ este nulă: $A_1 = 0$. De asemenea, avem și $A_2 = 0$.

2.1.5 Cazul funcționării monofazate

În acest caz, $u_3 = 0$ deci $U_{m3} = 0$.

Vom avea condițiile:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m$$

$$U_{m3} = 0; x_1 = 0; x_2 = \pi; x_3 \text{ oarecare}$$

Particularizând formulele generale din cazul (a, c, b) sau (b, c, a) obținem:

$$a_n = -\frac{8U_m}{\pi(4n^2 - 1)}; a_0 = \frac{4U_m}{\pi}; b_n = 0. \quad (12)$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{4U_m}{\pi} - \frac{8U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nx}{4n^2 - 1} \quad (13)$$

Amplitudinea armonicii fundamentale este:

$$A_1 = \frac{8U_m}{3\pi}; A_1 \approx 0,848 U_m. \quad (14)$$

2.2 Unele observații privind puntea de diode alimentată nesimetric

Se pot analiza și alte situații de alimentare cu sisteme nesimetrice particulare de tensiuni [7]. De asemenea, se pot considera și sisteme de secvență inversă. Pe baza metodei analitice prezentate anterior s-a elaborat un program de calculator (numit **PDIODE**) care ne furnizează pentru diverse sisteme nesimetrice de alimentare primele 10 armonici ale lui u_d , coeficientul global de nesimetrie, gradul de asimetrie, gradul de disimetrie, precum și reprezentarea grafică a spectrului lui u_d (amplitudinile funcție de ordinul armonicii respective). S-au comparat rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**, bazat pe metoda analitică) cu rezultatele simulării pe calculator (**PSPICE**). Rezultatele sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%. De asemenea, s-au făcut măsurători experimentale în laborator. Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acelea obținute prin simulație **PSPICE** (eroare relativă maximă 0,9%).

3. Introducerea unui coeficient global de nesimetrie (CGN)

Din cele prezentate în paragraful 2 privind puntea de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni, rezultă că oricărui sistem nesimetric îi corespunde în mod univoc o tensiune u_d și deci o serie Fourier atașată. La modificarea nesimetriei sistemului trifazat îi va corespunde o modificare corespunzătoare a seriei de armonici. Prin urmare, la modificarea nesimetriei sistemului trifazat (u_1, u_2, u_3) se va modifica spectrul de armonici al tensiunii u_d .

În acest fel, putem caracteriza un sistem trifazat nesimetric prin coeficienții a_n, b_n, a_0, a_1 seriei Fourier a tensiunii u_d obținută prin redresarea sistemului (u_1, u_2, u_3) cu o punte trifazată de diode [7].

3.1. Punerea problemei

În paragraful 2.1.4. am văzut că tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) nu are armonică corespunzătoare lui $n = 1$ (deci de pulsărie 2ω și frecvență $2f$) și de asemenea pentru $n = 2$ (deci de pulsărie 4ω și frecvență $4f$).

Pe de altă parte, tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat accentuat nesimetric cum este cel de la paragraful 2.1.5 (funcționare monofazată) conține o armonică importantă corespunzătoare lui $n = 1$ dar și una corespunzătoare lui $n = 2$.

Deoarece intuitiv este clar că la creșterea nesimetriei sistemului (u_1, u_2, u_3) trebuie să crească amplitudinea armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ din tensiunea u_d , vom defini în continuare un coeficient global de nesimetrie (**CGN**). Aceasta va ține seama concomitent de nesimetria de module și de nesimetria de faze.

Putem considera $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} , numere pozitive subunitare. Altfel spus, pentru orice sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) putem considera un sistem trifazat "asemenea" cu cel dat, la care $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} sunt numere pozitive subunitare iar fazele inițiale sunt aceleași cu ale sistemului inițial.

Definim coeficientul global de simetrie ca suma amplitudinilor armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ pentru tensiunea u_d atașată sistemului trifazat "asemenea" având $U_{m1} = 1$ [7].

Deoarece armonica corespunzătoare lui n are amplitudinea:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (15)$$

rezultă că armonicele corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ vor avea amplitudinile:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; A_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (16)$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \frac{A_1 + A_2}{U_{m1}} \quad (17)$$

Punând $U_{m1} = 1$, putem scrie:

$$k_n = A_1 + A_2 \quad (18)$$

Deoarece în această definiție se ia în considerare și armonica de ordinul 2, putem nota pentru claritate $k_n = k_{n2}$. Inițial am considerat un coeficient de nesimetrie care lua în considerare numai armonicele de ordinul 1 [7] și care avea definiția:

$$k_{n1} = \frac{A_1}{U_{m1}} \quad (19)$$

În urma cercetărilor efectuate am ajuns la concluzia că se poate face o caracterizare mai cuprinzătoare a nesimetriei unui sistem trifazat cu ajutorul coeficientului global de nesimetrie de ordinul 2 ($k_n = k_{n2}$). Din acest motiv, în cele ce urmează se va studia acest coeficient.

3.2. Analiza generală pe cazuri

Vom analiza cele patru cazuri, prezentând formulele de calcul pentru a_1, b_1, a_2, b_2 , care intervin în definiția coeficientului global de nesimetrie.

Considerăm la început cazul I. Este vorba de cazul (a, b, c).

Prin particularizarea formulelor generale (5) și (6), obținem expresiile pentru a_1, b_1, a_2, b_2 .

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (20)$$

Asemănător se procedează și în cazurile II, III și IV.

3.3. Analiza unor cazuri particulare

În cazul sistemului trifazat simetric (paragraful 2.1.4) coeficientul global de nesimetrie este nul:

$$k_n = 0 \quad (21)$$

În cazul $u_3 = 0$ și $u_2 = -u_1$ de funcționare monofazată (paragraful 2.1.5), coeficientul global de nesimetrie rezultă:

$$k_n = \frac{48}{15\pi} \approx 1,018 \quad (22)$$

3.4. Cazul sistemelor de secvență inversă

Având în vedere cele arătate în paragraful 2.2 rezultă că pentru orice sistem nesimetric de secvență inversă, coeficientul global de nesimetrie este egal cu cel al sistemului pereche de secvență directă [7].

4. Program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (VARK)

S-a realizat programul de calculator **VARK** care permite calculul și reprezentarea grafică 3D a variației coeficientului global de nesimetrie.

Coefficientul global de nesimetrie este o funcție (continuă) de patru parametri: U_{m2}, U_{m3}, x_2, x_3 (deoarece luăm întotdeauna $U_{m1} = 1, x_1 = 0$). Se pot realiza reprezentări grafice ale variației lui $k_n = k_{n2}$ funcție de 2 parametri, ceilalți 2 fiind menținuți constanti.

Programul **VARK** oferă următoarele posibilități de reprezentare:

1. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, U_{m3})$; 2. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_2)$; 3. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_3)$; 4. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_2)$; 5. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_3)$; 6. Grafic $k_{n2} = f(x_2, x_3)$; 7. Ieșire.

Pentru fiecare posibilitate, se pot realiza trei tipuri de reprezentări grafice:

1. Cu bare; 2. Suprafață; 3. Mixt.

De asemenea, la fiecare reprezentare se indică coeficientul global de nesimetrie maxim și sistemul nesimetric pentru care se obține. În grafic, acest maxim este indicat printr-o bară îngroșată.

Programul **VARK** lucrează în felul următor:

- Se introduce un sistem trifazat nesimetric prin parametrii U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , x_1 , x_2 , x_3 .
- Se realizează analiza armonică a tensiunii u_d corespunzătoare.
- Se alege una din cele șase variante de reprezentare 3D.

În acest moment, programul menține constanți cei doi parametri care nu variază în timpul reprezentării alese. Mai exact, valorile acestor parametri sunt "moșteniți" de la introducere (vezi punctul 1 de mai sus). Cei doi parametri variabili variază în conformitate cu rețelele de discretizare din figura 4. Programul calculează de fiecare dată valoarea coeficientului global de nesimetrie k_{n2} și apoi realizează reprezentarea grafică 3D a variației lui k_{n2} funcție de parametri variabili specifici variantei de reprezentare alese.

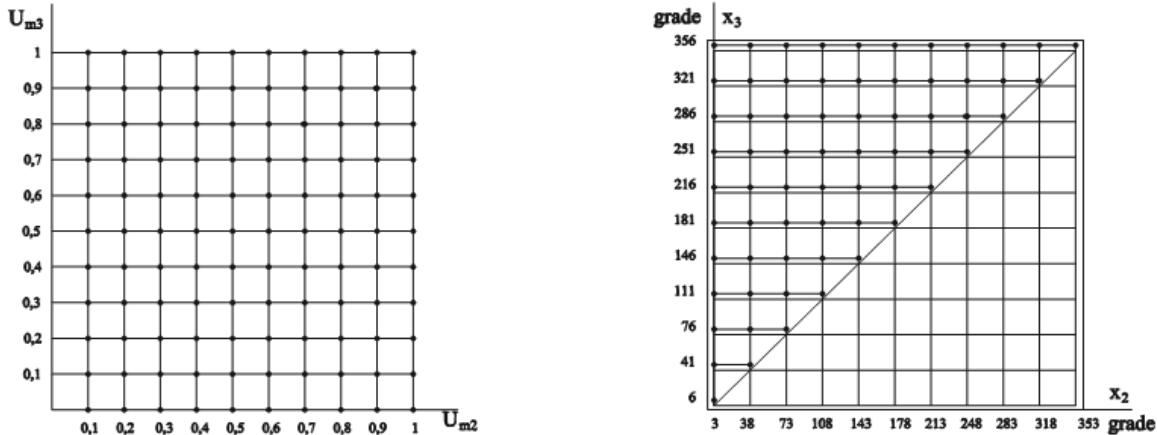


Fig. 4 Rețele de discretizare pentru U_{m2} , U_{m3} , x_2 , x_3

Aplicația Vark 1 lucrează după rețelele de discretizare din figura 4, deci realizează o diviziune a intervalului de variație maxim pentru x_2 și x_3 în $n = 11$ puncte. Aplicația Vark 2 permite o discretizare mai fină (corespunzătoare la $n = 11 \dots 15$, la alegere).

De asemenea, am realizat rularea programului **VARK** în mediul **MATLAB**. Datele obținute în programul **VARK** sunt transformate în fișiere ASCII care sunt prelucrate în mediul **MATLAB** pentru realizarea unor reprezentări grafice 3D cu parametri îmbunătățiți. Mediul **MATLAB** permite scalarea automată a axelor și modificarea punctului de vedere asupra suprafeței, ceea ce conduce la reprezentări 3D de calitate superioară. De asemenea se pot realiza reprezentări de forma "mesh" (suprafață-rețea) sau "surf" (suprafață plină). Suprafețele obținute sunt color, cu indicarea prin modificarea culorilor a variației lui k_{n2} .

5. Reprezentări grafice 3D ale variației coeficientului global de nesimetrie

În continuare sunt redate o serie de reprezentări grafice 3D ale variației coeficientului global de nesimetrie, realizate cu programul **VARK**, respectiv cu programul **VARK** rulat în mediul **MATLAB**.

PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI

GLOBAL DE NESIMETRIE (VARK)

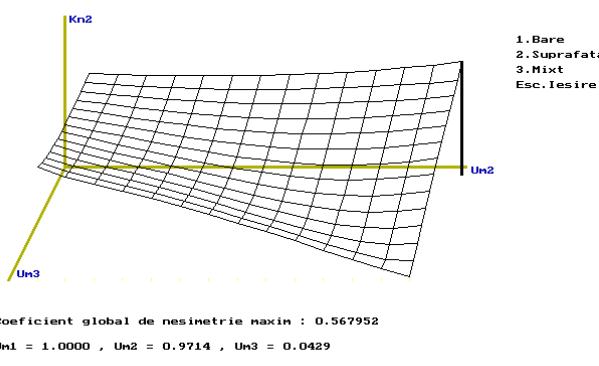


Fig. 5 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (varianta suprafață)

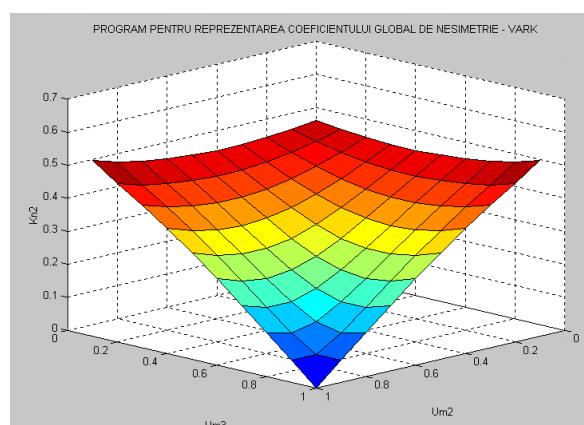


Fig. 6 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (varianta surf executată în Matlab cu Vark 1)

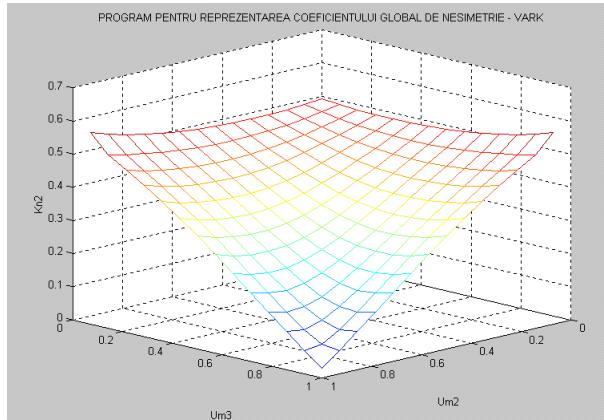


Fig. 7 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

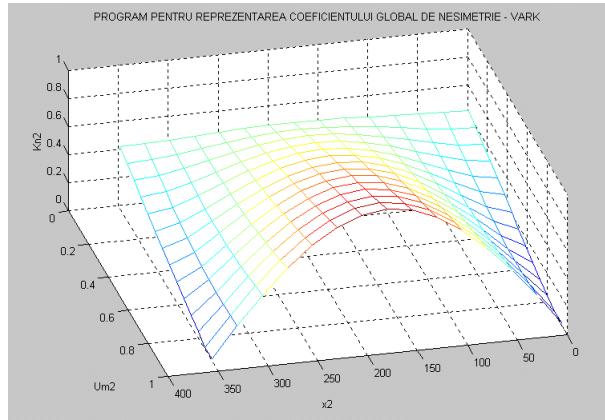


Fig. 8 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și x_2 și sunt constanți $U_{m3}=1$ și $x_3=356^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

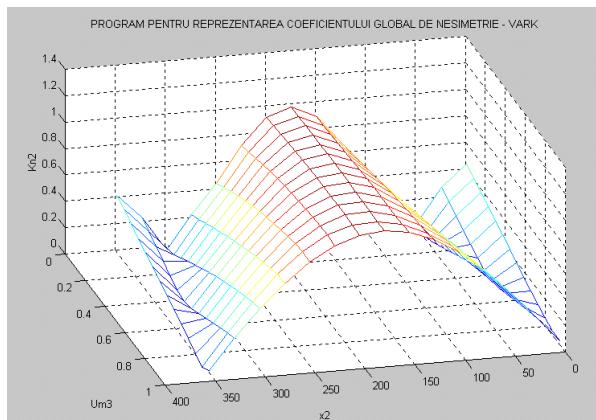


Fig. 9 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_2 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_3=356^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

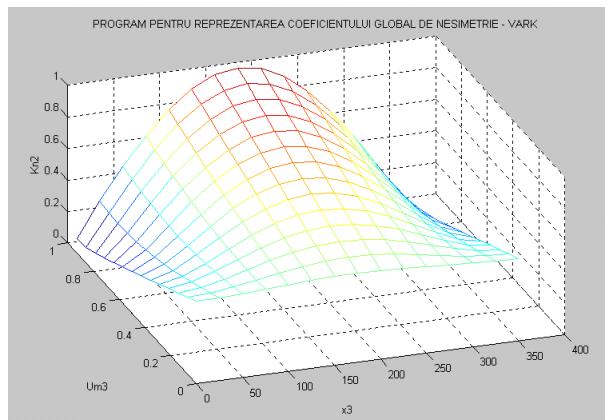


Fig. 10 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_3 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_2=3^\circ$ (variantă mesh executată în Matlab cu Vark 2)

6. Concluzii și observații

În această lucrare s-au pus în evidență o serie de aspecte legate de funcționarea unei punți trifazate de diode alimentate cu un sistem nesimetric de tensiuni.

La început, s-a considerat cazul punții de diode ideale alimentând o rezistență pură. S-a prezentat o metodă analitică exactă de calcul, în cele patru cazuri care pot exista. De asemenea, s-au analizat o serie de cazuri particulare. Pe baza metodei analitice prezentate, s-a elaborat programul de calculator **PDIODE**. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**) au fost comparate cu cele obținute prin simulare pe calculator, respectiv prin măsurători experimentale în laborator.

În continuare se propune introducerea unui coeficient global de nesimetrie pentru sistemele trifazate nesimetrice. După cum se știe, în mod clasic se indică nesimetria unui sistem trifazat prin gradul de asimetrie și gradul de disimetrie. Pentru ca nesimetria unui sistem trifazat să fie relativ mică, ambele grade trebuie să fie mai mici decât niște valori admise convențional, de exemplu 5%. Coeficientul global de nesimetrie (k_n) indică nesimetria sistemului printr-un singur număr cuprins între 0 și 1,018. S-au prezentat formulele analitice de calcul ale lui k_n pentru cele patru cazuri și valorile lui pentru unele cazuri particulare. De asemenea, s-a prezentat programul de calculator **VARK** care permite calcularea lui k_n și reprezentarea grafică a variației coeficientului global de nesimetrie, împreună cu rezultatele obținute cu acest program. Definirea acestui coeficient global de nesimetrie aparține autorului prezentei lucrări.

S-a realizat o aplicație tehnică a caracterizării nesimetriei unui sistem trifazat prin coeficientul global de nesimerie definit în prezenta lucrare. Este vorba de un releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare, care a fost brevetat (brevet OSIM nr. 87118).

S-a realizat un model experimental care a fost testat pe standul pentru încercarea motoarelor electrice, stand care a fost construit prin autodotare în laboratorul de electrotehnică [7]. Standul este prevăzut cu o frână cu curenți turbionari, proiectată și construită de asemenea în laboratorul de electrotehnică [7]. Prin încărcarea motorului cu diverse cupluri de sarcină s-a putut testa dispozitivul de protecție antibifazică în diverse regimuri de funcționare ale motorului protejat. Funcționarea dispozitivului de protecție a fost corespunzătoare.

Proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică s-a făcut în cadrul unui contract de cercetare-proiectare încheiat cu întreprinderea S.C. "RELEE" S.A. Mediaș [7]. Dispozitivul de protecție antibifazică a fost omologat la S.C."RELEE" S.A. Mediaș și asimilat în producția de serie, existând posibilitatea producerii lui, funcție de cerințele beneficiarilor. După o perioadă de stagnare datorată condițiilor grele cauzate de restructurare și tranziția la economia de piață, există în momentul de față o preocupare susținută la nivelul conducerii întreprinderii pentru promovarea acestui dispozitiv de protecție antibifazică. (**DPAB**). Astfel, s-a realizat reproiectarea și modernizarea acestui produs, însotită de îmbunătățirea tehnologiei de construcție.

7. Bibliografie

- [1] Brittain, J.E.- *Charles L.G. Fortescue and the method of symmetrical components*, Proceeding of the IEEE, Vol.86, no.5, May 1998, pp.1020-1025
- [2] Ciupa, R.V., Topa, V. – *The Theory of Electric Circuits*, Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1998
- [3] Clarke, E. - *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice* (traducere selectivă din limba engleză - S.U.A.), Editura Tehnică, București, 1973
- [4] Ionescu, T.G., Coculescu, S., Neagoe, M., Pavel, E. - *Regimul nesimetric generator de consumuri proprii tehnologice suplimentare în rețelele electrice*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.9, septembrie 1988, pag.404 - 411
- [5] Ionescu, T.G., Golovanov, C., Manolescu, P., Oprea, R. - *Metode de determinare a coeficientului de nesimetrie inversă de tensiune*; Energetica, Vol. XXXVIII, Nr. 8 - 9, august - septembrie 1990, pag. 371 - 376
- [6] Mocanu, C.I. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [7] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj - Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
- [8] Popa, V.M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință națională “Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30 mai – 1 iunie 2003, volum I, pag. 105-108
- [9] Sakai, M., Fujita, H. - *An Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.9, No.6, November 1994, pp.631-637
- [10] Simion, E., Man, E., Ciupa, R.V., Roșca, P., Neamțu, V., Popa, V.M. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [11] Șora, C. - *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [12] Țugulea, A., Golovanov, C. - *Efectele energetice ale regimurilor nesimetrice și deformante ale sistemelor electroenergetice. Posibilități de măsurare*; ENERG, Vol.III, Editura Tehnică, București, 1987, pag.130-162

Considerations upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors

Vasile Mircea Popa

University "Lucian Blaga" of Sibiu, Department of electrical Engineering, 2400 Sibiu, Romania

Abstract: The paper presents the problem of studying the working of the protection relay of asynchronous motors at the interruption of one phase, made by the author [1], when the three-phase system of tensions obtained at the outlet of the current transducers is non-symmetric.

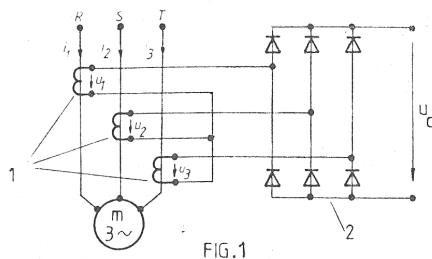
By rectifying the three-phase system shown in figure 2.a., at the outlet of the three-phase bridge we obtain the signal u_d shown in figure 2.b.[2]. We notice that the function

$$u_d(\omega t) = u_d(x)$$

is periodic, having the period $T = \pi$.

1. Introduction

Figure 1 represents the entrance circuit in the protection relay, formed by the current transducers (1) and the three-phase rectifier-bridge (2).

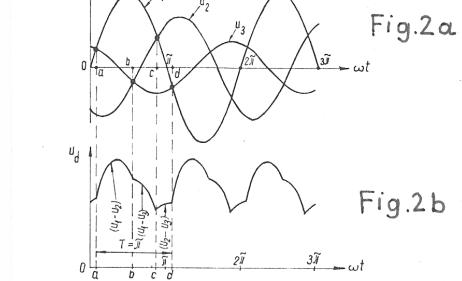


For a start, we have considered the case in which tensions u_1, u_2, u_3 are equally differentiated, but at different amplitudes:

$$U_m, \alpha U_m, \beta U_m; 0 < \beta < \alpha < 1.$$

2. The problem framing

In the paper we calculate the amplitude of the harmonic of 100 Hz, which plays a functional part essential to the relay and we also determinate the domain of variation of the α and β parameters which characterize the non-symmetric system of tensions so that the degree of dissymmetry may have an imposed value.



We may rewrite it as:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_1(x) - u_2(x); & x \in [a; b] \\ u_1(x) - u_3(x); & x \in [b; c] \\ u_2(x) - u_3(x); & x \in [c; d] \end{cases} \quad (1)$$

in which a, b, c, d are the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x), u_2(x)$ and $u_3(x)$ (fig.2.a).

The general expressions of the three-phase system are:

$$u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1); x_1 = 0; U_{m1} = U_m$$

$$u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2); x_2 = \frac{2\pi}{3}; U_{m2} = \alpha U_m \quad (2)$$

$$u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3); x_3 = \frac{4\pi}{3}; U_{m3} = \beta U_m$$

in which α and β are subunitary parameters.

The general expression of developing the function $u_d(x)$ in Fourier series is given by the relation 3:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{1} + b_n \sin \frac{n\pi x}{1} \right) \quad (3)$$

in which:

$$T = d - a = 2l = \pi$$

The coefficients of a serial development are given by the relations 4:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx \quad (4) \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx \end{aligned}$$

The harmonic of **100Hz** corresponds to the terms in (3) which have $n=1$. By replacing $n=1$ in the relations (4) we may express a_1 and b_1 depending on α and β .

Hence,

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = f(\alpha, \beta) \quad (5)$$

Calculating the degree of dissymmetry and the degree of assymmetry in the case of the system of tensions under consideration we obtain:

$$k_i = k_h = \frac{\sqrt{(2-\alpha-\beta)^2 + 3(\alpha-\beta)^2}}{2(1+\alpha+\beta)} \quad (6)$$

If we impose

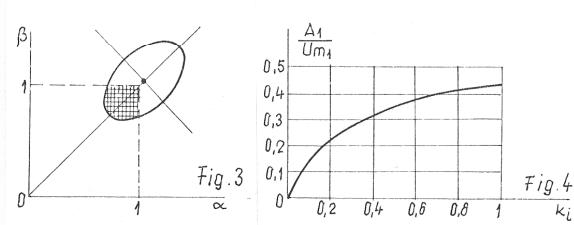
$$k_i = k_h \leq 10\%$$

we obtain the domain of variation for α and β shown in **figure 3.**, which has an elliptical shape, with the long semiaxis of

$$\frac{5\sqrt{2}}{16} \approx 0,44$$

and the short semiaxis of

$$\frac{1}{4} = 0,25$$



In the particular case when $\alpha = \beta$, we obtain:

$$k_i = k_h = \frac{1-\alpha}{1+2\alpha} \quad (7)$$

On performing the numerical calculations for : $k_i \in [0;1]$ we have obtained the dependence

$$\frac{A_1}{U_{ml}} = f(k_i)$$

shown in **fig.4.**

3. Conclusions

The paper demonstrates the necessity of taking into consideration the possibilities of an undesired switching in at the outlet of the current transducers in case of non-symmetry with the system of tensions.

4. References

- [1] P.Rosca, C.Diaconescu, V.M.Popă, L.Modran - *Releu pentru protectia motoarelor asincrone trifazate la intreruperea unei faze de alimentare*, Brevet de inventie 87118 din 19.03.1985
- [2] V.M.Popă - *Aplicatii si incercari experimentale privind comportarea circuitelor trifazate in regimuri nesimetrice*, Referat de doctorat nr.2, Universitatea Tehnica Cluj-Napoca, 1994.

ANEXA

**Tabel
care indică unde au mai fost publicate articolele**

Articolul	Unde a mai fost publicat
Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric.	A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Română-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag.199-204.
Studiul punții de diode alimentată nesimetric.	Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag.105-108.
Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni.	A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIEMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.173-176.
Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric.	A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Română-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3 și CD al sesiunii, pag.263-269.
Coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate.	Seminarul Științific Național “Electrotehnologii și Mediul ambiant”, Sibiu, 5-6 noiembrie 2004, Revista „Energetica”, nr. 12/2004, ISSN 1453-2360, pag.544-549.
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors.	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 15 -18 august 1996, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.37, nr. 1, ISSN 1224-2497, pag.61-62.

BIBLIOGRAFIE

- [A1] Abuelma'atti, M.T. - *Simple method for calculating Fourier coefficients of experimentally obtained waveforms*; IEE Proc. - Sci.Meas.Technol., Vol.141, No.3, May 1994, pp.177-178
- [A2] Akherraz, M. - *Pspice - Assisted Dynamic Modeling and Simulation of Induction Motor Drives*; 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 18-21, 1997, pp. MB1, 8.1-8.3
- [A3] Akpinar, K., Pillay, P., Richards, G.G. - *Induction motor drive behavior during unbalanced faults*; Electric Power Systems Research, Vol.36, No.2, February 1996, pp. 131-137
- [A4] Albu, T., Ion, I.D. - *Itinerar în algebra superioară*, Editura All, Bucureşti, 1997
- [A5] Amin, B. - *Contribution to iron-loss evaluation in electrical machines*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.5, No.5, Sep.-Oct. 1995, pp.325-332
- [A6] Amin, B. - *Slot - Based Equations and General Equivalent Circuit in Induction Motor-Analysis and Control*; ETEP, Vol.5, No.6, November/December 1995, pp.375-382
- [A7] Arkhangelskii, N.L., Kurnyshev, B.S., Zakharov, P.A. - *A tensor approach to the electromagnetic analysis of an induction motor*; Electrical Technology, Selected Translations from Elektrichestvo, No.1, 1995, pp.75-83
- [B1] Benamrouche, N., Haddad, S., Bousbaine, A., Low, W.F. - *Determination of iron and stray load losses in induction motors using a thermometric method*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.1, January 1998, pp.3-12
- [B2] Benes, J. - *Sisteme cibernetice cu organizare automată*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1970
- [B3] Bercovici, M., Arie, A., Tudose, M. - *Aspecte privind aplicarea teoriei componentelor simetrice în analiza regimurilor nesimetrice ale rețelelor electrice*; Buletinul Institutului Politehnic Bucureşti, tomul XXIX, numărul 4, iulie-august 1967, pag.101-131
- [B4] Berndt, M.M., Schmitz, N.L. - *Derating of Polyphase Induction Motors Operated with Unbalanced Line Voltages*; IEEE Trans. Power App. Syst., February 1963, pp.680-686

- [B5] Blasko, V., Kaura, V. - *A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter*; *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.12, No.1, jan.1997, pp.116-123
- [B6] Bogoevici, N., Toader, D. - *Utilizarea fazorilor de nesimetrie în analiza rețelelor electrice trifazate nesimetrice și dezechilibrate*; *Energetica*, Vol.41., nr.4-B, 1993, pag.29-34
- [B7] Bonacina, G., Salvetti, M., Zola, M. - *Structural testing of electromechanical equipment - Mathematical modeling and experimentation*; A.E.I. Automazione Energia Informazione, Vol.85, No.3, march 1998
- [B8] Bose, B.K., Patel, N.R. – *Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction motor*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.13, no.3, May 1998, pp.401-409
- [B9] Boys, J.T. - *Theoretical Spectra for Narrow-Band Random PWM Waveforms*; IEE Proceedings - B, Electric Power Applications, Vol.140, No.6, November 1993
- [B10] Brice, C.W., Dougal, R.A., Hudgins, J.K. – *Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers*; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, no.5, September-October 1996, pp.1005-1010
- [B11] Brittain, J.E.- *Charles L.G. Fortescue and the method of symmetrical components*, Proceeding of the IEEE, Vol.86, no.5, May 1998, pp.1020-1025
- [B12] Bromilow, M. - *Computer algebra and applied mathematics*; IEE Review, Vol.43, No.5, sept.1997, pp.259-267
- [B13] Busch, R. – *About the concept of consumed life of electrical machine windings and its application*, European Transaction on Electrical Power, Vol.8, no.2, March-April 1998, pp.105-110
- [C1] Caramia, P., Carpinelli, G., Gagliari, F., Verde, P. - *Analysis and Design of a Combined System of Shunt Passive and Active Filters*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.2, Mar.-Apr. 1994
- [C2] Castello, R., Montecchi, F., Rezzi, F., Baschirotto, A. - *Low - voltage analog filters*; *IEEE Transactions on Circuits and Systems I, Fundamental Theory and Applications*, Vol.42, No.11, November 1995, pp.827-840
- [C3] Cavallini, A., Loggini, M., Montanari, G.C. - *Comparison of Approximate Methods for Estimate Harmonic Currents Injected by AC/DC Converters*; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.41, No.2, april 1994, pp.256-262

- [C4] Cerovsky, Z., Seinsch, H.O. - *Time Dependence and Symmetrical Properties of Rotor - Currents of Induction Machines Fed from U-Converters with Block - Waveform*; Archiv fur Elektrotechnik, Vol.77, No.2, January 1994
- [C5] Cherry, J.A., Snelgrove, W.M. – *On the characterization and reduction of distortion in bandpass filters*, IEEE Transactions on Circuits and System I, Vol.45, no.5, May 1998, pp.523-537
- [C6] Ciupa, R.V., Croicu, A.M. – *The Optimization of an Electromagnet by the Gradient Method*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 75-77
- [C7] Ciupa, R.V. – *Regimuri tranzitorii în sisteme electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [C8] Ciupa, R.V., Croicu, A.M. – *Optimization in Electrotechnics trough the Descending Methods. Examples; Proceedings of the 1st International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits*, CADEMEC 97, 5-7 August 1997, Cluj-Napoca, Romania, Volume, pag. 102-107.
- [C9] Ciupa, R.V. , Topa, V. – *The Theory of Electric Circuits*, Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1998
- [C10] Ciupa, R.V. – *Regimuri tranzitorii în sisteme electrice*, ediția a-II-a, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1998
- [C11] Clarke, E. - *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice* (traducere selectivă din limba engleză -S.U.A.), Editura Tehnică, București, 1973
- [C12] Coloși, T., Feștilă, R., Nascu, I., Raica, P. - *Modelling and numerical simulation alternative of induction motors in d-q axes*; Proceedings, First International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Control Systems ELECTROMOTION'95, Cluj-Napoca, 25-26 May 1995, Volume, pp.116-119
- [C13] Cristaldi, L., Ferrero, A. - *Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: An algebraic approach*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.5, sep.-oct. 1996, pp.305-309
- [C14] Czarnecki, L.S., Tan, O.T. - *Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion Caused by Solid State Voltage Controllers of Induction Motors*; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.9, No.3, September 1994, pp.528-534

- [C15] Czarnecki, L.S. - *Power theory of electrical circuits with quasi-periodic waveforms of voltages and currents*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.5, sep.-oct. 1996, pp.321-328
- [C16] Czarnecki, L.S. - *Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents*; Electrical Engineering, Vol.80, No.6, december 1997, pp.359-368
- [D1] De Jong, H.C.J. - *Skew Leakage in Induction Machines*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.1, January-February 1994
- [D2] De Jong, H.C.J. - *Scale aspects of electrical machine inductances*; *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol.32, No.2, April 1995, pp.179-185
- [D3] Dems, M., Komeza, K., Wiak, S. - *Computation of rotor winding power losses in squirrel-cage induction motor*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.89-93
- [D4] Dessouky, Y.G., Williams, B.W., Fletcher, J.E. - *Cooling enhancement of electric motors*, IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol.145, No.1, January 1998, pp.57-60
- [D5] De Weerdt, R., Hameyer, K., Belmans, R. - *End winding leakage calculation of a squirrel-cage induction motor for different load conditions*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.85-89
- [D6] Ding, K.Q., Zhou, Z.G., Liu, C.T. – *Latin hypercube sampling used in the calculation of the fracture probability*, Reliability Engineering & Sistem Safety, Vol.59, no.2, February 1998, pp.239-242
- [D7] Dogaru, O., Tevy, I., Udriste, C. – *Extrema constrained by a family of curves and local extrema*, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol.97, no.3, June 1998, pp.605-622
- [D8] Dordea, T. - *Mașini electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970
- [D9] Dragomir, A., Laziun, V. - *Teorie combinatorie. Elemente de combinatorică clasică și generalizată*, Editura Universității din Timișoara, 1974
- [D10] Dragomir, A., Dragomir, P. - *Structuri algebrice*, Editura Facla, Timișoara, 1981

- [D11] Drăgănescu, O.G. - *Încercările mașinilor electrice rotative*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1987
- [D12] Dupre, L.R., Vankeer, R., Melkebeek, J.A.A. – *A computational model for the iron losses in rotating electrical machines*; International Journal of Engineering Science, Vol.36, no.7-8, May-June 1998, pp. 699-710
- [D13] Duric, M., Radojevic, Z., Skokljev, I., Terzija, V. - *A simple algorithm for the symmetrical components relaying and monitoring*; Electrical Engineering, Vol.79, 1996
- [E1] Eldhemy, S.A., Mohamed, A.A., Shokralla, S.S. - *Calculation of additional losses caused by feeding an induction motor from a nonsinusoidal supply*; International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.32, No.1, January 1995, pp.51-63
- [E2] El Din, A.S.Z., Lashine, A.E., Shokralla, S.S. - *Improvement of starting characteristic and speed control of three-phase induction motor using microprocesor*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.3, April 1998, pp.265-276
- [E3] Emanuel, A.E. - *The oscillatory nature of the power in single - and polyphase circuits*, European Transactions on Electrical Power, Vol.6, No.5, Sep.-Oct. 1996, 315-320
- [E4] Enns, M.K. – *Neutral impedances in fault analysis*; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, no.2, May 1998, pp.274-279
- [F1] Fabre, A., Saaid, O., Wiest, F., Boucheron, C.- *Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors*; Electronics Letters, Vol.31, No.20, September 1995, pp.1727-1728
- [F2] Faiz, J., Sharifian, M.B.B. - *Transient behaviour of optimum - designed three-phased squirrel-cage induction motors*; European Transactions on Electrical Power, Vol.7, No.6, Nov.-Dec. 1997, pp. 415-420
- [F3] Farag, S.F., Bartheld, R.G., May, W.E. - *Electronically Enhanced Low Voltage Motor Protection and Control*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.30, No.3, May/June 1994, pp.776-784
- [F4] Fiser, R., Ferkolj, S. – *Magnetic field analysis of induction motor with rotor faults*; COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.17, no.1-2, 1998, pp.206-211
- [F5] Fransua, A., Nicolaide, A., Trifu, G. - *Mașini electrice uzuale. Exploatare și regimuri de funcționare*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1973

- [F6] Fransua, A., Măgureanu, R. - *Mașini și acționări electrice. Elemente de execuție*, Editura Tehnică, București, 1986
- [G1] Gafford, B.N., Duesterhoeft, W.C., Mosher, C.C. - *Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages*, AIEE Transactions Power Applications Systems, June 1959, pp. 282-288
- [G2] Galan, N. - *Considerații privind teoria modernă a mașinii asincrone trifazate*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electronica, Vol.38, Nr.8, noiembrie 1990, pag.295-299
- [G3] Galan, N. - *Ecuările generale ale motorului asincron trifazat aplicate în regimuri nesimetrice*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica, Vol.38, Nr.8, noiembrie 1990, pag.300-305
- [G4] Ghani, S.N. - *Digital Computer Simulation of Three-Phase Induction Machine Dynamics - A Generalized Approach*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.1, January/February 1988, pp.106-114
- [G5] Gheorghiu, I.S., Fransua, A.S. - *Tratat de mașini electrice, Vol.III, Mașini asincrone*, Editura Academiei R.S.R., București, 1971
- [G6] Glazenko, A.V., Danilevich, Y.B., Karymov, A.A. - *Digital modelling of thermal and mechanical processes in electrical machines*; Electrical Technology, Selected Translations from Elecktrichestvo, No.4, 1995, pp.123-134
- [G7] Gluskin, E. - *On the Calculation of Ripple Factor*; ETEP, Vol.5, No.6, November/December 1995, pp.413-414
- [G8] Goode, P.V., Chow, M. - *Using a Neuronal Fuzzy System to Extract Heuristic Knowledge of Incipient Faults in Induction Motors: Part I - Methodology*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.2, April 1995, pp.131-138
- [G9] Goode, P.V., Chow, M. - *Using a Neuronal / Fuzzy System to Extract Heuristic Knowledge of Incipient Faults in Induction Motors: Part II - Application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.2, April 1995, pp.139-146
- [G10] Green, T.C., Taha, M.H., Rahim, A.B.D., Williams, B.W. - *Three-phase step-down reversible AC-DC power converter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.2, March 1997, pp.319-324
- [G11] Grimes, C.A., Grimes, D.M. - *Complex power in circuits with multiple reactive elements*, Electric Machines and Power Systems, Vol.25, No.9, Nov. 1997, pp.955-966

- [G12] Grotzbach, M., Xu, J. - *Line-Side Behaviour of 3-Phase Diode Rectifiers with Reactance Smoothing*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.1, Jan-Feb. 1994
- [H1] Holtz, J. - *The representation of AC machine dynamics by complex signal flow graphs*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, June 1995, pp. 263 - 272
- [H2] Ho, S.L., Fu, W.N. - *Review and future application of finite element methods in induction motors*; Electric Machines and Power Systems, Vol. 26, No. 2, February - March 1998, pp.111 - 126
- [I1] Ionescu, T.G., Coculescu, S., Neagoe, M., Pavel, E. - *Regimul nesimetric generator de consumuri proprii tehnologice suplimentare în rețelele electrice*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.9, septembrie 1988, pag.404 - 411
- [I2] Ionescu, T.G., Golovanov, C., Manolescu, P., Oprea, R. - *Metode de determinare a coeficientului de nesimetrie inversă de tensiune*; Energetica, Vol. XXXVIII, Nr. 8 - 9, august - septembrie 1990, pag. 371 - 376
- [I3] Ion, I.D., Niță, C., Năstăsescu, C. - *Complemente de algebră*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1984
- [J1] Joaquim, M. B. – *A bandpass active filter for Fourier analysis laboratory*; International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 32, No.4, October 1995, pp. 350 – 354
- [K1] Karacal, S.C. – *A novel approach to simulation modeling*, Computers & Industrial Engineering, Vol.34, no.3, July 1998, pp.573-588
- [K2] Kaufmann, A., Précigout, M. - *Elemente de teoria mulțimilor și algebră modernă*, Vol I, Editura Tehnică, București, 1972
- [K3] Kaufmann, A., Précigout, M. - *Elemente de teoria mulțimilor și algebră modernă*, Vol II, Editura Tehnică, București, 1973
- [K4] Keerthipala, W. W. L., Wai, C. T., Huisheng, W. - *Neuronal network based classifier for power system protection*; Electric Power Systems, Vol. 42, No. 2, august 1997, pp. 109 – 114
- [K5] Kellerer, H., Kotov, V., Speranza, M.C., Tuza, Z. – *Semi on-line algorithms for the partition problem*, Operations Research Letters, Vol.21, no.5, December 1997, pp.235-242

- [K6] Kluszczynski, K., Miksiewicz, R. - *Synchronous parasitic torques in asymmetrically fed three - phase squirrel cage motor*; Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, No. 1, January - February 1996, pp. 9- 20
- [K7] Knopp, M., Kohle, S. - *Time - varying loads in electric power systems; Power input, equivalent circuit elements, and disturbances*, European Transations on Electrical Power, Vol. 7, No.1, January - February 1997, pp. 5 - 12
- [K8] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol I - Algoritmi fundamentali*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1974
- [K9] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol II - Sortare și căutare*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1976
- [K10] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol III - Algoritmi seminumerici*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1983
- [L1] Labuntsov, V. A., Daizhun, C. - *Three - phase rectifier with a capacitance filter and an improved waveform for the current drawn from the network*; Electrichestvo, No. 2, 1993
- [L2] Lawrance, W. B. , Mielczarski, W. - *Harmonic Current Reduction in a Three - Phase Diode Bridge Rectifier*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 6, December 1992, pp. 571 - 576
- [L3] Lawrance, W. , Mielczarski, W., Michalik, G. - *Application of a new scheme for harmonic current reduction in three - phase bridge rectifier systems*; Electric Power Research, Vol. 36, No. 2, February 1996, pp. 123 – 130
- [L4] Lee, C.Y. – *Temperature-based optimal test sequence for determining the equivalent circuit parameters of a three-phase induction motor*, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.21, no.4, July 1998, pp.459-466
- [L5] Levi, E., Krzeminski, Z. - *Main Flux - Saturation Modelling in d-q Axis Models of Induction Machines Using Mixed Current - Flux State - Space Models*; ETEP, Vol. 6, No. 3, May - June 1996, pp.207 – 215
- [L6] Lian, J.A. – *Orthogonality criteria for multiscaling functions*, Applied and Computational Harmonic Analysis, Vol.5, no.3, July 1998, pp.277-311
- [L7] Lim, T.J. – *A stochastic regime switching model for the failure process of a repairable system*, Reliability Engineering & System Safety, Vol.59, no.2, February 1998, pp.225-238

- [L8] Lin, B.R., Hoft, R.G. - *Analysis of power converter control using neural network and rule-based methods*; Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, No. 7, October - November 1996, pp. 695 – 720
- [L9] Lin, K.P., Lin, M.H., Lin, T.P. – *An advanced computer code for single-tuned harmonic filter design*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, no.4, July-August 1998, pp.640-648
- [L10] Loggini, M., Montanari, G. C., Cavallini, A. - *Generation of Uncharacteristic Harmonics in Electrical Plants with AC/DC Converters*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No. 3, May - June 1994
- [M1] Maier, R. - *Protection of Squirrel-Cage Induction Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, No.2, March/April 1992, pp.376-380
- [M2] Man, E., Rizzo, R., Micu, D., Munteanu, D. - *A Simultaneous Treatment of Symmetrization and Power Factor Improvement in Three-Phased Networks*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 50- 52.
- [M3] Man, E., Pop, E. - *Impedance Adaptation and Negative Resistance Synthesis, using Controlled Sources*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 37, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1996, pag. 21 - 24
- [M4] Man, E. - *Circuite electrice cu surse comandate*, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1996
- [M5] Man, E. - *A Generalization of the Maximum Power Transfer Theorem In DC Circuits*; Proceedings of the 1st International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 97, CLuj-Napoca, 5-7 August 1997, Volume, pp.91-93
- [M6] Man, E., Hintea, S. - *Analiza circuitelor electrice prin modelare cu surse comandate*, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 1997
- [M7] Mattavelli, P., Tenti, P. - *Load and line identification in multi-phase systems: A compensation-oriented approach*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.6, November-December 1996, pp.373-379
- [M8] Mbamalu, G.A.N., El Hawary, M.E., El Hawary, F. - *Pseudo inverse based probabilistic power flow approach*; Electric Machines and Power Systems, Vol.23, No.2, March-April 1995, pp.107-119

- [M9] Micu, D., Oniga, A. - *Componente simetrice pentru sisteme polifazate*; Conferința Națională de Matematică Aplicată și Mecanică, Cluj-Napoca, 20-23 octombrie 1988
- [M10] Micu, D. - *Basis of Electrotechnics. The theory of electric circuits*, Technical University of Cluj-Napoca, 1993.
- [M11] Micu, D., Rizzo, R., Man, E. - *A Study on Polyphase Machine Fed by Non Symmetrical Voltage System*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 53 - 57
- [M12] Micu, D., Rizzo, R., Man, E. - *Polyphase Machine Fed by Non Symmetrical System. Fault Detection in Case of Bar Breakage in Three-Phase Motors*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 58 - 61
- [M13] Micu, D., Micu, A., Vlad, S. - *A Dissipative Singlephase-Threephase Convertor*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 37, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1996, pag. 57 - 60
- [M14] Mielczarski, W., Lawrance, W.B., Nowaki, R., Holmes, D.G. - *Harmonic Current Reduction in Three-Phase Bridge-Rectifier Circuits Using Controlled Current Injection*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.5, October 1997, pp.604-611
- [M15] Mihalache, M. – *Determinarea parametrilor interni ai motorului asincron utilizând datele de catalog: Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica*, vol. 34, nr. 6, august 1986, pag. 261-264.
- [M16] Milenko, D. B. - *Determining symmetric components by a method of four samples (power system analysis)*, Electrichestvo, No. 9, September 1992, pp. 50-51
- [M17] Mocanu, C.I. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [M18] Modran, L., **Popa, V.M.**, Crăciunaș, G., Spătar, O. – *Electrotehnica și electronică*, Editura Meteor, Sibiu, 1998
- [M19] Moshchinskii, Y. A., Osin, I. L. - *Determination of three-phase induction motor parameters from an asymmetric supply test*, Electrichestvo, Nr. 1, 1993
- [N1] Nakagawa, S., Niki, N., Hashiguchi, H. – *Computer algebra application to the distribution of sample correlation coefficient*, Mathematics and Computers in Simulation, Vol.45, no.1-2, January 1998, pp.23-32
- [N2] Năstăsescu, C., Niță, C., Vraciu, C. - *Bazele algebrei*, Vol.I, Editura Academiei, București, 1986

- [N3] Neamțu, V. - *Circuite electrice în regim permanent sinusoidal și nesinusoidal - culegere de probleme*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [N4] Nedelcu, V.N. - *Regimurile de funcționare ale mașinilor de curent alternativ*, Editura Tehnică, București, 1968
- [N5] Nedelcu, V.N. - *Teoria conversiei electromecanice*, Editura Tehnică, București, 1978
- [N6] Nilsson, W.J. - *Electric Circuits*, Fourth Edition, Addison Wesley Co., Iowa State University, 1993
- [O1] Oberretl, K. - *Tooth breakage and tooth forces in asynchronous motors*; Electrical Engineering, Vol.80, No.5, October 1997, pp.309-324
- [O2] Ostovic, V. - *Computer-aided Analysis of Electric Machines*, Prentice Hall, New York, 1994
- [P1] Palco, S. - *Structural optimisation of an induction motor using a genetic algorithm and a finite element*; Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.84, 1996, pp.2-99
- [P2] Pană, T. - *MATLAB în sisteme de acționare electrică*, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 1996
- [P3] Pană, T. - *MATLAB Application Toolbox, Electrical Drives - Induction Motor*, Mediamira Science Publisher, Cluj-Napoca, 1997
- [P4] Pandurangavittal, K., Fakmddin, D.B., Rao, I. R. , Parthasarathy, K. - *Microcontroller based three-phase induction motor protection relay with operator selectable thermal I-T curve feature*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.1, January 1998, pp.13-26
- [P5] Pavel, E., Ionescu, T.G. - *Efectele consumatorilor nesimetrici asupra rețelelor electrice*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.10, octombrie 1986, pag.457-459
- [P6] Pavel, E. - *Receptoare trifazate dezechilibrate. Caracteristic și particularități de funcționare în regimuri stabilizate*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.6, iunie 1988, pag.241-249
- [P7] Pavel, E. - *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol.VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag.194-220
- [P8] Pavel, E. - *Noi aspecte ale teoriei receptoarelor trifazate statice dezechilibrate*; Energetica, Vol.37, Nr.11, noiembrie 1989, pag.481-492
- [P9] Perahia, J., Nayar, C.V. - *Analysis of a series - delta connected tandem induction motor*; Electric Machines and Power Systems, Vol.23, No.2, March-April 1995, pp.221-230

- [P10] Pillay, P., Sabur, S.M.A., Haq, M.M. - *A model for induction motor aggregation for power system studies*; Electric Power Systems, Vol.42, No.3, September 1997, pp.225-228
- [P11] Pillay, P., Nolan, R., Haque, T. - *Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, No.5, September-October 1997, pp.1273-1282
- [P12] Pinto, J.A.D., Coimbra, A.P., Antunes, C.L., Fernandez, X.M.L., Donsion, M.P. – *Influence of the neutral in the thermal performance of a three-phase induction motor under unbalanced power supply using the finite element approach*, COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.17, no.1-2, 1998, pp.378-382
- [P13] **Popa, V.M.** - *Unele generalizări în combinatorică*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.III, Sibiu, 1980, pag.33-39
- [P14] **Popa, V.M.**, Diaconescu, C. - *Noi cercetări privind protecția motoarelor asincrone*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.IV, 1981, pag.244-247
- [P15] **Popa, V.M.**, *Asupra numărării bijecțiilor între două mulțimi multiple*; Gazeta Matematică - Perfecționare metodică și metodologică în matematică și informatică, Vol.VII, Nr.2, București, 1986, pag.78-81
- [P16] **Popa, V.M.** - *Asupra unei probleme de algebră*; Astra Matematică, Vol.1, Nr.1, Sibiu, 1990, pag.29-31
- [P17] **Popa, V.M.** - *On a question of linear programming*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.X (1), Sibiu, 1993, pag.65-67
- [P18] **Popa, V.M.** - *Unele aspecte privind caracterizarea circuitelor trifazate dezechilibrate*; Referat de doctorat nr.1, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, octombrie 1993
- [P19] **Popa, V.M.** - *Aplicații și încercări experimentale privind comportarea circuitelor trifazate în regimuri nesimetrice*; Referat de doctorat nr.2, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, octombrie 1994
- [P20] **Popa, V.M.** - *On a classification of the three-phase loads*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XIV (2), Sibiu, 1995, pag.87-90
- [P21] **Popa, V.M.** - *A new approach to be characterized the unbalanced three-phase loads*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XIV (2), Sibiu, 1995, pag.91-93

- [P22] **Popa, V.M.**, Buduriști, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
- [P23] **Popa, V.M.** - *A Mathematical Model for Polyphasic Loads Unbalanced Classes Analysis*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.91-92
- [P24] **Popa, V.M.** - *On an Analysis for the Unbalanced Loads*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.93-94
- [P25] **Popa, V.M.** - *Considerații privind comportarea circuitelor electrice în regimuri nesimetrice de funcționare*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XX, Sibiu, 1995, pag.129-134
- [P26] **Popa, V.M.** - *Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.37, No.1, Cluj-Napoca, 1996, pag.61-62
- [P27] **Popa, V.M.**, Roșca, P. - *Electrotehnică*, Editura Universității "Lucian Blaga", Sibiu, 1996
- [P28] **Popa, V.M.** - *Electrotehnică - îndrumar de laborator*, Editura Universității "Lucian Blaga", Sibiu, 1996
- [P29] **Popa, V.M.** – *Aspecte energetice privind alimentarea receptorilor dezechilibrați*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P30] **Popa, V.M.** – *Caracterizarea algebrică a receptoarelor dezechilibrate discrete*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P31] **Popa, V.M.** – *Metode pentru calculul numărului receptoarelor dezechilibrate discrete*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P32] **Popa, V.M.** – *Metoda de recurență pentru calculul numărului claselor de dezechilibru ale receptoarelor m-fazate*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P33] Popescu, D., Vraciu, C. - *Elemente de teoria grupurilor finite*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [P34] Prisăcaru, A., Cojocaru-Filiu, C. - *On the nonsinusoidal and unsymmetrical behaviour of three-phase asynchronous motor*; Proceedings, First International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Control Systems ELECTROMOTION'95, Cluj-Napoca, 25-26 May 1995, Volume, pp.116-119
- [P34-a] Pyati, V.P. – *Comment on "On the geometry of parallel impedances"*, IEEE Transactions on Education, Vol.41, no.2, May 1998, pp.171-176

- [R1] Ramras, M. – *Congestion-free routings of linear complement permutations*, Siam Journal of Discrete Mathematics, Vol.11, no.3, 1998, pp.487-500
- [R2] Rankin, D.R. - *The industrial application of phase current analysis to detect rotor winding faults in squirrel cage induction motors*; Power Engineering Journal, Vol.9, No.2, April 1995, pp.77-89
- [R3] Rashid, M.H., Maswood, A.I. - *Analysis of Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.3, May/June 1988, pp.449-455
- [R4] Rashid, M.H., Maswood, A.I. - *A Novel Method of Harmonic Assessment Generated by Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.4, July/August 1988, pp.590-597
- [R5] Rastogi, M., Mohan, N., Henze, C.P. - *Three-phase sinusoidal current rectifier with zero-current switching*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.10, No.6, November 1995, pp.753-760
- [R6] Ravezzi, L., Stoppa, D., DallaBetta, G.F. – *Current-mode A/D converter*, Electronics Letters, Vol.34, no.7, April 1998, pp.615-616
- [R7] Reljin, B., Ristic, S., Sreckovic, M. - *Analysis of some physical phenomena and processes by equivalent electrical circuits*, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.33, No.4, October 1996, pp.353-360
- [R8] Richter, R. - *Mașini electrice, Vol.IV, Mașini asincrone*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1960
- [R9] Riordan, J. - *An Introduction to Combinatorial Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967
- [R10] Riordan, J. - *Combinatorial Identities*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1968
- [R11] Roger Folch, J., Joares, V.J.Z. - *Contribution to the transient analysis of induction motors solving the electrodynamic equations by using the finite elements method*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.93-97
- [R12] Roșca, P., Diaconescu, C., Modran, L, **Popa, V.M.** - *An Improved Protection Method at the Electric Drive Systems with Asynchronous Motors*; A treia Conferință Națională de Acționări Electrice, Brașov, 28-30 mai 1982, volum, pag.A135-A138

- [R13] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.**, Modran, L. - *Calculul armonicii de 100Hz din tensiunea obținută prin redresarea unui sistem trifazat asimetric cu ajutorul unei punți trifazate*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.VI, 1982, pag.130-134
- [R14] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Releu cu fiabilitate ridicată pentru protecția complexă a motoarelor asincrone trifazate*; Conferința Națională de Energetică, București, 23-25 noiembrie 1983, volum secția 34, pag.34.091-34.096
- [R15] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *The Influence of Non-Symmetric States on the Functioning of the Electronic Relay RPMA-1 of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors at the Interruption of one Phase*; A patra Conferință Națională de Acționări Electrice, Craiova, 20-21 septembrie 1984, volum, pag.C127-C130
- [R16] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.**, Modran, L. - *Releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare*; Brevet de Invenție 87118 din 19.03.1985
- [R17] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Frână cu curenți turbionari*; Buletinul Științific al Institutului de Subîngineri Sibiu, Vol.VII, 1985, pag.68-71
- [R18] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Instalație pentru ridicarea caracteristicii mecanice a motoarelor electrice*; Buletinul Științific al Institutului de Subîngineri Sibiu, Vol.IX, 1986, pag.370-373
- [R19] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.** - *Proiectarea produsului “Dispozitiv de protecție antibifazică” în vederea asimilării în fabricație*, Contract de cercetare științifică între Institutul de Subîngineri Sibiu și Intreprinderea de Relee Mediaș, 1989
- [R20] Roșca, P., Modran, L., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C. - *Cuplaj - frână electromagnetic*, Brevet de invenție 108833 din 30.08.1996
- [R21] Rosolowski, E., Izykowski, J., Kasztenny, B., Saha, M.M. - *A new distance relaying algorithm based on complex differential equation for symmetrical components*; Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.175-180
- [R22] Rukgauer, A., Schiehlen, W. – *Simulation of modular dynamic systems*, Mathematics and Computers in Simulation, Vol.46, no.5-6, June 1998, pp.535-542
- [S1] Saari, J. - *Thermal modelling of high-speed induction machines*; Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.82, 1995, pp.1-82

- [S2] Șafarevici, I.R. - *Noțiunile fundamentale ale algebrei*, Editura Academiei, București, 1989
- [S3] Sakui, M., Fujita, H, Shioya, M. - *A Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, August 1989, pp.434-440
- [S4] Sakui, M., Fujita, H. - *Calculation of Uncharacteristic Harmonics of a Three-Phase Bridge Rectifier with DC Current Ripple*; Electrical Engineering in Japan, Vol.111, No.5, 1991, pp.127-129
- [S5] Sakui, M., Fujita, H. - *Harmonic Analysis of a Capacitor-Filtered Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with Complex Source Impedance*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.39, No.1, February 1992, pp.80-81
- [S6] Sakui, M., Fujita, H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
- [S7] Sakui, M., Fujita, H. - *An Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.9, No.6, November 1994, pp.631-637
- [S8] Sakui, M, Minamijima, M., Amei, K., Fujita, H. - *Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of an AC/DC Converter with AC Filters*; ETEP, Vol.6, No.2, March/April 1996, pp.97-101
- [S9] Salmon, J.C. - *Operating a three-phase diode rectifier with a low-input current distortion using a series-connected dual boost converter*; IEEE Transactions on Power Electronic, Vol.11, No.4, July 1996, pp.592-604
- [S10] Sarkar, D. – *Approximate analysis of temperature rise in a induction motor during dynamic braking*, Electric Machines and Power Systems, Vol.26, no.6, July 1998, pp.585-600
- [S11] Sasdelli, R., Menchetti, A. - *Some remarks on power theories*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.6, November-December 1994, pp.457-463
- [S12] Schoen, R.R., Habetler, T.G. - *A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions*; Electric Machines and Power Systems, Vol.25, No.2, February-March 1997, pp.141-152

- [S13] Shi, K.L., Chan, T.F., Wong, Y.K. - *Modelling of the three-phase induction motor using SIMULINK*; 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 18-21, 1997, pp.WB3, 6.1-6.3
- [S14] Shi, S.W. - *Study of fault analysis using two vector system symmetrical components*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.2, February-March 1998, pp.155-170
- [S15] Simion, E., Mîndru, G., Gligor, T., Nicula, O. – *Bazele electrotehnicii*, Institutul Politehnic, Cluj, 1972
- [S16] Simion, E. – *Electrotehnica*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978
- [S17] Simion, E., Maghiar, T. - *Electrotehnica*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [S18] Simion, E., Man, E., Munteanu, C. – *The Symmetrization of the Line Current's Three-Phased System Using the Symmetric Components Method*; Annual Scientific Workshop, Oradea, 29-30 May, 1992
- [S19] Simion, E., Ursu, M.F., Man, E. - *The Systematization of the Three-Phase Electric Circuit in Sinusoidal Steady State - The Tripole*, Proceedings of 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.79-83
- [S20] Simion, E., Țopa, M. - *On Symbolic Analysis for Analog Filter Design*, Proceedings of the 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.181-185
- [S21] Simion, E., Man, E., Munteanu, C. - *Contributions to the symmetrization of line current three-phase system*, Proceedings of the 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments, OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.287-291
- [S22] Simion, E., Man, E., Ciupa, R.V., Roșca, P., Neamțu, V., **Popa, V.M.** - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [S23] Simion, E., Munteanu, C., Topa, V. – *The Numerical Analysis of the Electromagnetic Interference Phenomena in Printed Circuit Boards Using the Transmission Line Model*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.37, Nr.1, Cluj-Napoca, 1996, pag.35-38
- [S24] Slemon, G.R. - *Modelling of Induction Machines for Electric Drives*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.25, No.6, November/December 1989, pp.1126-1131

- [S25] Smith, O.D. – *Generation of ground structures for 2D and 3D design domains*, Engineering Computations, Vol.15, no.4, 1998, pp.462-500
- [S26] Smolleck, H.A. - *A new look at the effects of unbalanced voltages upon synchronous and induction machines*; Electric Power Systems Research, Vol.25, 1992, pp.199-206
- [S27] Soliman, S.A, Al Kandari, A.M., El Hawary, M.E. - *Time domain estimation techniques for harmonic load models*; *Electric Machines and Power Systems*, Vol.25, No.8, October 1997, pp.885-896
- [S28] Sonea, P., Fransua, A., Nicolaide, A., Saal, C. - *Electrotehnica, mașini și instalații electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1966
- [S29] Șora, C. - *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [S30] Sowaied, A., Taleb, M. - *Assessment of power converter harmonics*; *Electric Machines and Power Systems*, Vol.24, No.2, March 1996, pp.147-158
- [S31] Speranza, F. - *Relații și structuri*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1975
- [S32] Stănașilă, O. - *Noțiuni și tehnici de matematică discretă*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1985
- [S33] Stringer, N.T., Waser, D. - *An innovative method of providing total breaker failure protection*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.5, September-October 1996, pp.1011-1017
- [S34] Șurianu, F.D. - *Experiment și simulare numerică a comportării motoarelor asincrone la gurile de tensiune simetrice*; Energetica, Vol.42, Nr.5-B, 1994, pag.223-226
- [T1] Terzija, V., Djuric, M. - *A numerical algorithm for direct real-time estimation of voltage phasor, frequency and its rate of change*; *Electric Machines and Power Systems*, Vol.24, No.4, June 1996, pp.417-428
- [T2] Timotin, A., Hortopan, V., Ifrim, A., Preda, M. - *Lecții de bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970
- [T3] Țogui, L., Covrig, M., Manoliu, V. - *Determinarea cuplului electromagnetic al masinii asincrone trifazate cu înfășurări nesimetrice*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica, Vol.44, Nr.5-6, mai-iunie 1996, pag.19-21

- [T4] Țogui, L., Covrig, M., David, F. - *Modelul matematic al masinii asincrone trifazate cu înfășurare nesimetrică pe stator; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica*, Vol.43, Nr.7-8, iulie-august 1995, pag.21-25
- [T5] Tomescu, I. - *Introducere în combinatorică*, Editura Tehnică, București, 1972
- [T6] Tomescu, I. - *Introduction to Combinatorics*, Collet's (Publishers) Limited, London and Wellingborough, 1975
- [T7] Tomescu, I. - *Combinatorică și teoria grafurilor*, Editura Universității din București, 1978
- [T8] Tomescu, I. - *Probleme de combinatorică și teoria grafurilor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [T9] Tou, M., Al Haddad, K., Olivier, G., Rajagopalan, V. - *Analysis and design of single-controlled switch three-phase rectifier with unity power factor and sinusoidal input current*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.4, July 1997, pp.608-614
- [T10] Țugulea, A. - *Considerații privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.3, martie 1986, pag.121-129
- [T11] Țugulea, A. - *Considerații referitoare la definirea factorului de putere pentru sistemele trifazate dezechilibrate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.4, aprilie 1986, pag.164-167
- [T12] Țugulea, A., Golovanov, C. - *Efectele energetice ale regimurilor nesimetrice și deformante ale sistemelor electroenergetice. Posibilități de măsurare*; ENERG, Vol.III, Editura Tehnică, București, 1987, pag.130-162
- [V1] Vaananen, J. - *Combination of two-dimensional finite element analysis of electrical machines with circuit simulation techniques*; Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.80, 1995, pp.1-104
- [V2] Văzdăuțeanu, O. - *Cu privire la compensarea nesimetriei într-un sistem trifazat de tensiuni*; Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice din Timișoara, tomul 37 (51), fascicola 1-2, ianuarie-decembrie 1992, pag.73-76
- [W1] Waikar, D.L., Elangovan, S., Liew, A.C. - *Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method. 1. Mathematical modelling*; Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.189-194

- [W2] Waikar, D.L., Liew, A.C., Elangovan, S. - *Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method. 2. Performance evaluation;* Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.195-202
- [W3] Wang, Y.J., Pierrat, L., Feuillet, R. - *An Analytical Method for Predicting Current Harmonics Produced by an AC/DC Converter under Unbalanced Supply Voltage;* ETEP, Vol.2, No.4, July/August 1992, pp.237-244
- [W4] Wang; Y.J., Pierrat, L. - *Probabilistic modelling of current harmonics produced by an AC/DC converter under voltage unbalance;* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993, pp.2060-2066
- [W5] White, D.J. – *Epsilon dominance and constraint partitioning in multiple objective problems,* Journal of Global Optimization, Vol.12, no.4, June 1998, pp.435-445
- [W6] Willems, J.L. - *The compensation of non-active currents for three-phase power systems in sinusoidal steady state;* Electrical Machines and Power Systems, Vol.21, No.6, November-December 1993
- [W7] Willems, J.L. - *Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: A geometrical approach;* European Transactions on Electrical Power, Vol.6, No.5, September-October 1996, pp.299-304
- [W8] Williams, J.E. - *Operation of 3-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages;* AIEE Transactions Power Applications Systems, Vol.PAS-73, April 1954, pp.125-133
- [W9] Witherspoon, S.A., Choma, J. - *The analysis of balanced, linear differential circuits;* IEEE Transactions on Education, Vol.38, No.1, February 1995, pp.40-51
- [W10] Woll, R.F. - *Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors;* IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-11, No.1, January/February 1975, pp.38-42
- [W11] Wroblewski, Z. – *Digital simulation of reliability of contacts used in AC electromagnetic contactors,* European Transactions on Electric Power, Vol.8, no.3, May-June 1998, pp.201-206
- [X1] Xia, R.W., Chen, S.J. – *A quasi-analytic method for structural optimization,* Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.14, no.6, June 1998, pp.569-580

- [X2] Xypteras, J., Maras, K., Spyrelis, D. - *Calculation of the temperature distribution in an asynchronous machine*; European Transaction on Electrical Power Engineering, Vol.5, No.3, May-June 1995, pp.181-187
- [Y1] Yacamini, R. - *Power system harmonics. 4. Inter-harmonics*; Power Engineering Journal, Vol.10, No.4, August 1996, pp.185-196
- [Y2] Yu, D.C., Chen, D., Ramasamy, S., Flinn, D.G. - *A Windows based graphical package for symmetrical components analysis*; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.4, November 1995, pp.1742-1749
- [Z1] Zaninelli, D., Zanotti, P. - *Simplified frequency dependent model for induction machines*; Electric Machines and Power Systems, Vol.22, No.6, November-December 1994, pp.727-742
- [Z2] Zuckerberger, A., Alexandrovitz, A. - *Modelling and Simulation of Unsymmetrical Supplied Three-Phase Induction Motor*; ETEP, Vol.6, No.3, May/June 1996, pp.189-194

BIBLIOGRAFIE SUPLIMENTARĂ

- [B14] Boldea, I. – *Transformatoare și mașini electrice*, Editura Politehnica, 2001
- [B15] Buta, A., Milea, L., Pană, A. – *Impedanța armonică a rețelelor electrice*, Editura Tehnică, București, 2000
- [B16] Buta, A., Pană, A., Milea, L. – *Calitatea energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2001
- [D14] Delapeta, M., Deaconu S., Iagăr, A. – *Echipamente electrice*, vol. I și vol. II, Centrul de Multiplicare al U.P.T., 2000
- [F7] Felea, I., Coroi, N. – *Fiabilitatea și menenanța echipamentelor electrice*, Editura Tehnică, București, 2001
- [F8] Felea, I., Dale, E. – *Efecte ale regimului deformant și nesimetric*, Editura Universității din Oradea, 2002
- [F9] Felea, I., Rancov, N., Haș, V. – *Testing procedure in distortional operation condition of asynchronous machine*, Conferința de Inginerie Energetică CIE 2008, Oradea
- [H3] Hortopan, G. – *Aparate electrice de comutație*, Editura Tehnică, București, 1993
- [I4] Iordănescu, I., Golovanov, N., Postolache, P., Toader, C., Porumb, R., Lipan, L., Popescu, S. – *Instalații electrice și elemente de audit electroenergetic*, Editura TIPOGAL 2008

- [M20] Milici, Mariana – Circuite electrice – *Regimuri sinusoidale și particulare de funcționare*, Editura MatrixRom, București, 2005
- [P35] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnica, Cluj-Napoca, 1999
- [P36] Popa, V.M. - *A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load*, Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag.9-12
- [P37] Popa, V.M. - *The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations*, Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag. 13-16
- [P38] Popa, V.M. - *Considerații privind alimentarea receptorilor dezechilibrați*, Sesiunea de comunicări științifice a Universității “Petru Maior”, Târgu Mureș, 27-28 octombrie 2000, Volumul 7, Electroenergetică, ISBN 973-8084-19-9, pag. 191-196
- [P39] Popa, V.M., Popescu, Lizeta - *Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIEMEN - 2001, Republica Moldova, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag. 165-166
- [P40] Popa, V.M., Popescu, Lizeta - *Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIEMEN - 2001, Republica Moldova, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag. 173-176
- [P41] Popa, V.M. - *The Complex Analysis of the Real Unbalanced Load*, www.roger-univ.ro, Publicații; Analele Universității Româno-Germane din Sibiu; Secțiunea Tehnică, Sibiu, 2002
- [P42] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului dezechilibrat real*, Lucrările celei de A Doua Conferințe Naționale „Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 31 mai; 1-2 iunie 2002, Volumul Știință și Inginerie (Vol. I), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8130-83-2, pag. 69-74
- [P43] Popa, V.M. - *Analiza cazurilor limită ale receptorului dezechilibrat real*, Sesiunea Jubiliară de Comunicări Științifice cu Participare Internațională prilejuită de împlinirea a 30 de ani de învățământ superior de stat în Arad, Arad, 28-29 noiembrie 2002, Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Volum, Seria Electrică, ISSN 1582-3377, pag. 126-131

- [P44] Popa, V.M. - *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag. 105-108
- [P45] Popa, V.M. - *Studiul receptorului trifazat cu coeficienți de dezechilibru reali*, A treia sesiune anuală de comunicări științifice a cadrelor didactice, Universitatea Român-Germană Sibiu, 30 aprilie 2004, Volum 2; ISBN 973-7998-11-1, pag. 101-111
- [P46] Popa, V.M. - *Analiza receptorului dezechilibrat real cu coeficienți de dezechilibru reali*, Lucrările celei de A Patra Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 21-23 mai 2004; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. V), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-67-9, pag. 151-156
- [P47] Popa, V.M. - *Factor global de nesimetrie pentru sisteme trifazate*, Seminarul Științific Național “Electrotehnologii și Mediul ambiant”, Sibiu, 5-6 noiembrie 2004, Revista „Energetica”, nr. 12/2004, ISSN 1453-2360, pag. 544-549
- [P48] Popa, V.M. - *Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric*, A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Român-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag. 199-204
- [P49] Popa, V.M. - *Asupra nesimetriei unui sistem trifazat*, Lucrările celei de A V-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 3-4 iunie 2005; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 7), ISBN 973-720-015-2; ISBN 973-8130-84-0, pag. 241-246
- [P50] Popa, V.M. - *The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load*, Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151
- [P51] Popa, V.M. - *Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice*, Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4, pag. 309-314
- [P52] Popa, V.M. - *Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric*, A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Român-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3 și CD al sesiunii, pag. 263-269
- [P53] Popa, V.M. - *Rezultate experimentale și comparative privind puntea de diode în regim de alimentare nesimetric*, Lucrările celei de A VII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii

- românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2007; Volumul „Ştiință și Inginerie” (vol. 11), ISBN 973-8130-82-4, pag. 191-196
- [P54] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului extrem dezchilibrat generalizat*, Lucrările celei de A IX-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 5-6 iunie 2009; Volumul „Ştiință și Inginerie” (vol. 15), ISBN 973-8130-82-4, pag. 363-368
- [P55] Popa, V.M. – *Aspecte de combinatorică cu aplicații în electrotehnică*, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2009
- [P56] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului echilibrat real*, Lucrările celei de A X-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 4-5 iunie 2010; Volumul „Ştiință și Inginerie” (vol. 17), ISSN 2067-7138, pag.357-362
- [P57] Postolache, P., Toader, C. – *Calitatea și eficiența energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2007
- [P58] Popa, V.M. – *Receptoare generalizate în electrotehnică*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2010
- [P59] Popescu, Lizeta – *Echipamente electrice*, Editura Alma Mater, Sibiu, 2008
- [P60] Popa, I., Popa, G. N. – *Dispozitive electronice cu structură cablată și programată de protecție a motoarelor asincrone trifazate de joasă tensiune*, Editura Mirton, Timișoara, 2000
- [R23] Rancov, N. – *Aspects regarding experimental determination of thermal inertia at asynchronous motors operating in harmonics regime*, CIE 2009, Oradea
- [V3] Vasilievici, A. – *Aparate și echipamente electrice*, vol. I, vol. II, Editura MS, Sibiu, 1995, 1996
- [W12] www.moeller.net
- [W13] www.siemens.com
- [W14] www.omron.com
- [W15] www.littelfuse.com
- [W16] www.fairchildsemi.com

[W17] www.futureelectronics.com

[W18] www.datasheetcatalog.com

[W19] www.schneider-electric.ro

[W20] www.ganzkk.ro