

CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA GOLURILOR DE TENSIUNE DIN REȚELELE ELECTRICE ÎN APRECIEREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Energetică
de către

Ing. Florin Stelian MOLNAR-MATEI

Conducători științifici:

Prof.univ.dr.ing. Adrian BUTA

Prof.univ.dr.ing. Corneliu VELICESCU

Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Cornel TOADER

Prof.univ.dr.ing. Ioan FELEA

Prof.univ.dr.ing. Mihai MOGA

Data susținerii tezei: 12.II.2010

PREFAȚĂ

Teza de doctorat cumulează rezultatele studiilor și cercetărilor științifice desfășurate în cadrul catedrei de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică.

În primul rând, vreau să aduc un omagiu plin de recunoștință regretatului Prof.dr.ing. Adrian BUTA, cel care mi-a fost ca un părinte și care m-a îndrumat în scurta perioadă de colaborare, atât în domeniul activităților de cercetare, cât și în problemele de natură personală.

În continuare, doresc să adresez mulțumiri conducătorului care m-a preluat, Prof.dr.ing. Corneliu VELICESCU, sub îndrumarea căruia am ajuns în această etapă de finalizare a tezei de doctorat. Cu deosebită stimă, le adresez alese mulțumiri celor care și-au adus aportul la conturarea formei finale a tezei: Prof.dr.ing. Mihai MOGA, Prof.dr.ing. Vasile DUȘA și Conf.dr.ing. Adrian PANĂ.

O parte din ideile regăsite în această lucrare s-au conturat cu prilejul cooptării mele în echipele de soluționare a unor contracte de cercetare, conduse de Prof.dr.ing. Dumitru TOADER și respectiv Prof.dr.ing. Flavius Dan ȘURIANU. Am ținut cont de asemenea de sugestiile, criticile și aprecierile formulate cu diverse ocazii de Prof.dr.ing. Petru GHEJU, Prof.dr.ing. Bucur LUȘTREA, Prof.dr.ing. Ștefan KILYENI, Conf.dr.ing. Gheorghe VUC, Șl.dr.ing. Iona BUCATARIU și Șl.dr.ing. Ioan BORLEA. Mulțumesc pe această cale și colegilor mei dr.ing. Alexandru BĂLOI și dr.ing. Constantin BĂRBULESCU pentru sprijinul acordat.

Recunoștința mea se îndreaptă și spre ing. Iosif IUHASZ, de la Sucursala de Transport Timișoara din cadrul C.N.T.E.E. Transelectrica S.A., precum și ing. Antoniu REVICZKY de la Compania de Distribuție „ENEL Distribuție Banat”, pentru deosebita disponibilitate și suportul tehnic acordat la efectuarea măsurătorilor.

Mulțumesc în mod deosebit, și pe această cale, membrilor comisiei de analiză a tezei de doctorat, Prof.dr.ing. Cornel TOADER (Universitatea POLITEHNICA din București), Prof.dr.ing. Ioan FELEA (Universitatea din Oradea) și Prof.dr.ing. Mihai MOGA (Universitatea „Politehnica” din Timișoara), pentru atenția cu care au parcurs lucrarea, pentru criticile și aprecierile formulate, pentru sfaturile primite.

Nu în ultimul rând, mulțumesc surorii mele ing. Monica IOVAN, pentru tot efortul depus în partea de implementare software, și fără de care finalizarea tezei ar fi fost încă departe.

Un gând de mulțumire îl adresez familiei, pentru răbdarea de care a dat dovadă și sprijinul moral și material pe care mi l-au acordat.

Timișoara, februarie 2010

Florin Molnar-Matei

Molnar-Matei, Florin Stelian

Contribuții privind analiza golurilor de tensiune din rețelele electrice în aprecierea calității energiei electrice

Cuvinte cheie: gol de tensiune, consumator de sistem, achiziții date, prelucrare semnale digitale, segmentare, motor de inducție.

Rezumat:

Dezvoltarea și mai ales diversificarea continuă a consumatorilor electrici a impus introducerea condițiilor de calitate a energiei electrice furnizate, îndeosebi insistându-se asupra continuității în alimentare și a nivelului tensiunii la consumatori.

În condițiile când standardele privind calitatea energiei electrice furnizate au impus legic nivele de calitate ridicate la consumatori, este obligatorie găsirea de modele și sisteme de apreciere a nivelului tensiunii și a caracteristicilor acesteia.

Teza de doctorat își propune dezvoltarea unor metode de identificare și caracterizare a golurilor de tensiune cu scopul evidențierii efectelor acestora asupra consumatorilor electrici, îndeosebi a consumatorilor echivalenți, precum și modul de propagare în rețea a acestor goluri de tensiune. Se propune o metodologie de analiză a acestor goluri de tensiune prin conceperea unor algoritmi care să evidențieze principalul efect al golurilor de tensiune asupra rețelei, adică estimarea creșterii curenților fazelor în funcție de parametrii golurilor de tensiune.

Teza abordează cazuri concrete ale unor configurații reale ale unor rețele de înaltă tensiune unde se oferă soluții proprii, de apreciere a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem, pe baza unor criterii implementate software în pachete de programe. Toate criteriile introduse sunt comparate și validate atât prin simulare software cât și prin măsurători în rețeaua reală.

În contextul progresului tehnicii de calcul și a IT-ului, studiul teoretic și practic realizat în cadrul tezei de doctorat conduce la recomandarea privind implementarea software a metodelor dezvoltate în cadrul acestei teze, în cadrul echipamentelor de monitorizare, automatizare și protecție a rețelelor electrice.

CUPRINS

PREFAȚĂ	3
CUPRINS	5
LISTĂ DE FIGURI.....	9
LISTĂ DE TABELE	13
1. INTRODUCERE.....	15
2. ASPECTE ACTUALE ALE PROBLEMEI CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE. GOLURI DE TENSIUNE	19
2.1. Aspecte generale privind calitatea energiei electrice	19
2.2. Definiții ale calității energiei electrice	21
2.3. Standardizarea calității energiei electrice	23
2.3.1. Necesitatea standardizării	23
2.3.2. Standarde românești și internaționale.....	24
2.4. Goluri de tensiune. Chestiuni generale	25
2.4.1. Cauzele de apariție a golurilor de tensiune	26
2.4.2. Efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor de energie electrică	28
2.4.3. Metodele și mijloacele de atenuare sau de eliminare a efectelor golurilor de tensiune.....	31
2.5. Dinamica cercetărilor în probleme de goluri de tensiune	35
2.5.1. Studii asupra problemelor generale legate de golurile de tensiune	37
2.5.2. Studii privind influențele economice ale golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție și asupra consumatorilor	40
2.5.3. Studii referitoare la metode de compensare și diminuare a efectelor golurilor de tensiune	41
2.5.4. Studii privitoare la influența și combaterea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor	44
2.6. Concluzii și contribuții.....	46
3. ANALIZA CALITĂȚII TENSIUNII	47
3.1. Probleme generale privind calitatea tensiunii.....	47

3.1.1. Perturbații electromagnetice. Definiții și clasificări	47
3.1.2. Terminologie folosită în problematica calității energiei electrice.....	48
3.1.3. Niveluri de compatibilitate, acceptabilitate și niveluri de planificare	51
3.2. Calitatea tensiunii furnizate. Perturbații ale curbei tensiunii	54
3.2.1. Definiții și terminologie.....	54
3.2.2. Indicatorii golurilor de tensiune	57
3.2.3. Indicatorii fluctuațiilor de tensiune	59
3.2.3. Indicatorii regimului nesinusoidal.....	61
3.2.4. Indicatorii regimului nesimetric	64
3.2.6. Monitorizarea calității energiei electrice.....	66
3.3. Studiu de caz.	68
3.3.1. Determinări experimentale. Măsurători	68
3.3.2. Înregistrările curbelor de tensiune și de curent	69
3.3.3. Gradul de nesimetrie al sistemului de tensiuni trifazate	72
3.3.4. Fenomenul de flicker	73
3.3.5. Întreruperi și variații de tensiune	74
3.4. Concluzii	75

4. CARACTERIZAREA GOLURILOR DE TENSIUNE77

4.1. Parametrii caracteristici	77
4.1.1. Amplitudinea și durata golului de tensiune	77
4.1.2. Saltul unghiului de fază	80
4.2. Clasificarea goluri de tensiune în sistemele trifazate.....	81
4.2.1. Clasificarea ABC	82
4.2.2. Clasificarea după metoda componentelor simetrice.....	84
4.2.3. Comparație între cele două metode de clasificare	86
4.3. Metode de determinare a tipurilor golurilor de tensiune obținute din înregistrarea curbei de tensiune	87
4.3.1. Metoda componentelor simetrice	88
4.3.2. Metoda celor șase faze	91
4.3.3. Metoda grafică a lui Leborgne de clasificare a golului de tensiune	92
4.3.4. Metoda grafică a lui Bollen de clasificare a golului de tensiune.....	94
4.3.5. Comparație între cele două metode grafice.....	97
4.4. Metodă propusă pentru caracterizarea golurilor de tensiune	99

4.5. Concluzii și contribuții	106
5. CONSIDERAREA CONSUMATORILOR COMPLECȘI ÎN ANALIZA REGIMURILOR DE GOL DE TENSIUNE	109
5.1. Aspecte generale	109
5.1.1. Structura de principiu a consumatorilor complecși considerată pentru regimuri dinamice	109
5.1.2. Reprezentarea componentei statice	110
5.1.3. Reprezentarea componentei rotative	111
5.2. MM al MI echivalent componentei rotative din CC.....	112
5.2.1. Ipoteze simplificatoare și convenții de semn adoptate	113
5.2.2. Ecuațiile de funcționare ale mașinii de inducție (MI).....	114
5.2.3. Precizări referitoare la parametrii ecuațiilor mașinii echivalente	117
5.3. CD neliniare ale MI echivalent din CC.....	117
5.3.1. Aspecte generale.....	117
5.3.2. Ecuațiile statorice	118
5.3.3. Ecuațiile rotorice (de stare).....	121
5.3.4. Ecuațiile de ieșire	124
5.3.5. Concluzii și sistematizare	125
5.4. Analiza regimurilor de gol de tensiune ale CC	126
5.4.1. Analiza comportării MI la perturbații de tip gol de tensiune	127
5.4.2. Algoritm pentru analiza comportării CC la perturbații de tip gol de tensiune.....	132
5.5. Validarea modelului matematic	133
5.6. Determinarea experimentală a parametrilor consumatorului complex.....	137
5.7. Concluzii și contribuții	143
6. ANALIZA EFECTELOR GOLURILOR DE TENSIUNE ASUPRA CONSUMATORILOR DE SISTEM.....	133
6.1. Introducere în metoda de analiză	133
6.2. Realizarea bazei de date unice	146
6.3. Algoritm pentru prelucrarea datelor înregistrate	148
6.3.1. Prelucrarea curbelor înregistrate	149
6.3.2. Segmentarea	150
6.3.3. Determinarea mărimilor electrice pe segmente și salvarea datelor	152

6.4. Procedura de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem.....	153
6.5. Studiu de caz	155
6.5.1. Stabilirea zonei de rețea analizate și realizarea bazei de date.....	155
6.5.2. Prelucrarea datelor	156
6.5.3. Identificarea consumatorului de sistem.....	159
6.5.4. Analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem identificat.....	165
6.6. Concluzii și contribuții.....	169
7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII	171
ANEXE	175
ANEXA 1 – MĂSURĂTORI ȘI PRELUCRĂRI PENTRU ANALIZA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE.....	175
ANEXA 2 – DETERMINAREA GOLURILOR DE TENSIUNE PENTRU DIFERITE SITUAȚII.....	205
ANEXA 3 – DETERMINAREA TIPULUI GOLURILOR DE TENSIUNE CU METODELE PREZENTATE.	211
ANEXA 4 – FORMATUL FIȘIERELOR COMTRADE.	215
ANEXA 5 – CONVERSIE DIN FORMATE SPECIALE ÎN FIȘIERE COMTRADE.....	217
ANEXA 6 – CAPTURĂ DIN PROGRAMUL EVENIMENTE.	218
BIBLIOGRAFIE	219
SINTEZĂ PRIVIND LUCRĂRILE PROPRII	229

LISTA DE FIGURI

Nr. crt.	Numărul figurii	Titlul figurii
1.	Fig.2.1.	Curbele de acceptabilitate a echipamentelor: a) CBEMA, b) ITIC, c) SEMI.
2.	Fig.2.2.	Diferite soluții de alimentare a receptoarelor sensibile sau nu la goluri de tensiune.
3.	Fig.2.3.	Dinamica studiilor, privind golurile de tensiune, publicate în baza de date IEEE.
4.	Fig.2.4.	Dinamica studiilor, privind problemele generale ale golurile de tensiune, publicate în baza de date IEEE.
5.	Fig.2.5.	Dinamica studiilor, privind influențele economice ale golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție și asupra consumatorilor, publicate în baza de date IEEE.
6.	Fig.2.6.	Dinamica studiilor, referitoare la metode de compensare și diminuare a efectelor golurilor de tensiune, publicate în baza de date IEEE.
7.	Fig.2.7.	Dinamica studiilor, privitoare la influența și combaterea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor, publicate în baza de date IEEE.
8.	Fig.3.1.	Reprezentarea grafică a principiilor compatibilității electromagnetice.
9.	Fig.3.2.	Procedura de evaluare a unei sarcini perturbatoare.
10.	Fig.3.3.	Indicele de severitate a golului de tensiune calculat în raport cu curba de acceptabilitate SEMI.
11.	Fig.3.4.	Caracteristica $P=1$ (curba de iritabilitate) pentru variații dreptunghiulare și echidistante de tensiune.
12.	Fig.3.5.	Curba de probabilitate cumulată pentru variațiile sub formă de flicker pe barele de alimentare ale unui cuptor electric.
13.	Fig.3.6.	Măsuri pentru realizarea monitorizării energiei electrice.
14.	Fig.3.7.	Metoda de urmărire a indicatorilor de calitate a tensiunii.
15.	Fig.3.8.	Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 fișier Bârzava.
16.	Fig.3.9.	Factorul de nesimetrie pentru tensiune.
17.	Fig.3.10.	Factorul de nesimetrie pentru curent.

Nr. crt.	Numărul figurii	Titlul figurii
18.	Fig.3.11.	Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{str} , P_{It}) pentru faza a, V_a nivel 6kV.
19.	Fig.3.12.	Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{str} , P_{It}) pentru faza a, V_a nivel 0,4kV.
20.	Fig.4.1.	Valoarea efectivă a unui gol de tensiune obținută conform celor două metode.
21.	Fig.4.2.	Schemă pentru analiză a influenței scurtcircuitelor asupra golurilor de tensiune.
22.	Fig.4.3.	Schemă unei rețele electrice de distribuție pentru analiza propagării golului de tensiune.
23.	Fig.4.4.	Clasificarea golurilor de tensiune după metoda componentelor simetrice: a) Gol de tensiune trifazat simetric.
24.	Fig.4.5.	Coeficientul T care indică tipul golului de tensiune.
25.	Fig.4.6.	Tensiunile efective de linie și de fază determinate conform metodei celor șase faze.
26.	Fig.4.7.	Curbe determinate teoretic pentru fiecare tip de gol de tensiune cu algoritmul Leborgne.
27.	Fig.4.8.	Curbe determinate teoretic pentru fiecare tip de gol de tensiune cu algoritmul Bollen. a) căderi de tensiune pe o fază; b) căderi de tensiune pe două faze.
28.	Fig.4.9.	Tensiuni de fază în valori efective.
29.	Fig.4.10.	Determinarea tipului de gol de tensiune cu metode grafice – cazul 1.
30.	Fig.4.11.	Determinarea tipului de gol de tensiune cu metode grafice – cazul 2.
31.	Fig.4.12.	Schemă logică algoritm determinare gol de tensiune.
32.	Fig.4.13.	Determinarea golului de tensiune în prima etapă.
33.	Fig.4.14.	Determinarea golului de tensiune din a doua etapă.
34.	Fig.5.1.	Structura de principiu considerată pentru CC în regim staționar de referință.
35.	Fig.5.2.	Structura recomandată pentru MM al CC.
36.	Fig.5.3.	Reprezentarea unor convenții de semn adoptate.
37.	Fig.5.4.	Mașina de inducție reală.
38.	Fig.5.5.	Mașina de inducție echivalentă.
39.	Fig.5.6.	Definiția t.e.m. u_{ed} și u_{eq} .
40.	Fig.5.7.	Înfășurarea statorică: a) schema echivalentă, b) diagrama fazorială.

Nr. crt.	Numărul figurii	Titlul figurii
41.	Fig.5.8.	Diagrama fazorială a mărimilor statorice.
42.	Fig.5.9.	Ordinograma programului de analiză a regimului tranzitoriu al MI.
43.	Fig.5.10.	Schema echivalentă a MI.
44.	Fig.5.11.	Schema echivalentă redusă a MI.
45.	Fig.5.12.	Ordinograma programului de analiză a regimului tranzitoriu al CC.
46.	Fig.5.13.	Schema de simulare a comportamentului unui motor asincron, realizată în Matlab.
47.	Fig.5.14.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) obținute cu modelul matematic dezvoltat în această lucrare.
48.	Fig.5.15.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) obținute cu modelul matematic din MatLab.
49.	Fig.5.16.	Algoritmul de estimare a parametrilor CC.
50.	Fig.5.17.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii rezistenței statorice.
51.	Fig.5.18.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii inductivității sincrone.
52.	Fig.5.19.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii inductivităților tranzitorii.
53.	Fig.5.20.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii constantei de timp electrice.
54.	Fig.5.21.	Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii constantei de timp mecanice.
55.	Fig.6.1.	Algoritmul programului „Evenimente” pentru realizarea bazei de date.
56.	Fig.6.2.	Algoritmul programului „Prelucrare Date”.
57.	Fig.6.3.	Procedeu de segmentare a unui gol de tensiune.
58.	Fig.6.4.	Algoritm pentru determinarea caracteristicilor mărimilor electrice de interes.
59.	Fig.6.5.	Procedură de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem
60.	Fig.6.6.	Forma undelor de tensiune (a) și de curent (b) pe durata golului de tensiune analizat.
61.	Fig.6.7.	Forma undelor de tensiune (a) și de curent (b) pe frecvența fundamentală pe durata golului de tensiune analizat.

Nr. crt.	Numărul figurii	Titlul figurii
62.	Fig.6.8.	Segmentarea golului de tensiune.
63.	Fig.6.9.	Captură din program care prezintă rezultatele obținute prin aplicarea algoritmului propus pentru identificarea caracteristicilor golului de tensiune.
64.	Fig.6.10.	Identificarea tipului golului de tensiune – Etapa 1.
65.	Fig.6.11.	Reprezentarea tensiunilor efective.
66.	Fig.6.12.	Reprezentarea curenților efectivi.
67.	Fig.6.13.	Reprezentarea puterilor activă și reactivă.
68.	Fig.6.14.	Captură din program privind setarea caracteristicilor golurilor de tensiune.
69.	Fig.6.15.	Captură privind reglarea manuală a parametrilor consumatorului de sistem.
70.	Fig.6.16.	Captură privind pornirea estimării automate a parametrilor consumatorului de sistem.
71.	Fig.6.17.	Variația puterilor active (a) și reactive (b) și variația curenților pe faze (c, d, e) în urma procesului de estimare a parametrilor consumatorului de sistem.
72.	Fig.6.18.	Parametrii echivalenți ai componentei statice, rezultați în urma procesului de estimare.
73.	Fig.6.19.	Parametrii echivalenți ai componentei dinamice, rezultați în urma procesului de estimare.
74.	Fig.6.20.	Variația puterilor active (a) și reactive (b) și variația curenților pe faze (c, d, e) în pentru consumatorul identificat anterior supus la o altă perturbație.

LISTA DE TABELE

Nr. crt.	Numărul tabelului	Titlul tabelului
1.	Tabelul 2.1.	Intervalele de timp ale eficacității diferitelor sisteme de compensare a golurilor de tensiune.
2.	Tabelul 3.1.	Caracteristicile variațiilor de tensiune din sistemul electroenergetic.
3.	Tabelul 3.2.	Caracteristicile principalelor perturbații de tensiune.
4.	Tabelul 3.3.	Matricea de monitorizare a golurilor și întreruperilor de tensiune.
5.	Tabelul 3.4.	Valori recomandate pentru nivelurile de planificare ale tensiunilor armonice (% din tensiunea nominală) conform standardului [EN50160].
6.	Tabelul 3.5.	Valori recomandate pentru nivelurile de planificare ale tensiunilor armonice (% din tensiunea nominală) pentru rețelele de JT [IEC61000-2-2], MT, ÎT [IEC61000-3-6].
7.	Tabelul 3.6.	Nivelul armonicilor înregistrate cu sistemul NEXUS în cursul celei de a doua zi.
8.	Tabelul 3.7.	Valorile coeficienților de corelație.
9.	Tabelul 3.8.	Spectrul armonic în afara perioadei de perturbație.
10.	Tabelul 3.9.	Raportul dintre armonicile de joasă și medie tensiune.
11.	Tabelul 4.1.	Timpii uzuali ai protecțiilor din SEN.
12.	Tabelul 4.2.	Definirea amplitudinii și duratei golului de tensiune în diferite standarde.
13.	Tabelul 4.3.	Clasificarea golurilor de tensiune conform clasificării ABC.
14.	Tabelul 4.4.	Goluri si nivele de tensiune diferite datorate diferitelor tipuri de defecte.
15.	Tabelul 4.5.	Definirea caracteristicilor golurilor de tensiune trifazate nesimetrice.
16.	Tabelul 4.6.	Conversia de la caracterizarea ABC la cea după componentele simetrice.
17.	Tabelul 4.7.	Tipul golului de tensiune conform algoritmului celor șase faze.

Nr. crt.	Numărul tabelului	Titlul tabelului
18.	Tabelul 4.8.	Relații teoretice dintre tensiunile de fază și tensiunile de linie, în cazul diferitelor tipuri de goluri de tensiune.
19.	Tabelul 4.9.	Relații teoretice dintre tensiunile de fază minimă și maximă, în cazul golurilor de tensiune.
20.	Tabelul 4.10.	Relații pentru determinarea amplitudinii golurilor de tensiune când se cunoaște valorile efective ale tensiunilor pe faze.

1. INTRODUCERE

Odată cu creșterea consumului de energie electrică, consumatorii au început să ridice anumite cerințe în ceea ce privește continuitatea în alimentare cu energie electrică. Ulterior pornindu-se de la cerințele consumatorilor a apărut o nouă noțiune denumită calitatea energiei electrice și care în principiu se referea la calitatea tensiunii electrice furnizate la bornele consumatorului.

Din domeniul calității energiei electrice se remarcă o categorie de perturbații care poartă denumirea de goluri de tensiune. Acestea reprezintă o scădere a tensiunii la bornele consumatorilor, sub un anumit nivel denumit prag, și actualmente reprezintă una dintre cele mai studiate probleme din cadrul calității energiei electrice.

Dezvoltarea rapidă a tehnicii de calcul, precum și automatizarea tot mai accentuată a majorității proceselor tehnologice, au condus la creșterea sensibilității consumatorilor la perturbații produse în alimentarea acestora. Dintre aceste perturbații, în această lucrare, se tratează efectele golurilor de tensiune. Astfel, un gol de tensiune poate conduce la întreruperea în alimentare a unor echipamente de automatizare, alimentate cu surse de tensiune în comutație care sunt foarte sensibile la scăderi ale valorii tensiunii de alimentare. Această întrerupere a alimentării echipamentelor de automatizare conduce în general la întreruperea întregului proces de producție, ceea ce generează pierderi financiare atât din punct de vedere a întreruperii procesului de producție dar mai ales datorită posibilității de deteriorare a produsului final. În literatura de specialitate s-au realizat o multitudine de studii care analizează efectele financiare ale golurilor de tensiune și toate studiile au ajuns la concluzia că pierderile anuale sunt foarte mari. Acest lucru a condus la creșterea pretențiilor consumatorilor în ceea ce privește calitatea tensiunii de alimentare.

În consecință, au fost elaborate diverse studii axate pe diferite aspecte ale problemei golurilor de tensiune cum ar fi:

- depistarea și reducerea surselor de goluri de tensiune;
- propagarea golurilor de tensiune în rețeaua electrică;
- efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor (motoare de inducție, sisteme de calcul și automatizări, contactoare electrice, etc.);
- determinarea sensibilității la goluri de tensiune pentru fiecare consumator în parte și gruparea acestora pornind de la criteriile de sensibilitate;
- dezvoltarea de metode și realizarea de echipamente pentru compensarea golurilor de tensiune sau pentru reducerea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor sensibili.

Totuși trebuie menționat că există și domenii mai puțin studiate, dintre care amintim efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor echivalenți, precum și efectele consumatorilor echivalenți asupra propagării golurilor de tensiune. Bineînțeles, aceasta reprezintă o problemă a rețelei de distribuție și este mai puțin importantă din punct de vedere al consumatorului individual, dar este esențială pentru furnizorul de energie electrică, atât la nivel de distribuție cât și de transport.

În acest context, teza de doctorat are ca obiect dezvoltarea unei metode de identificare și caracterizare a golurilor de tensiune, cât și o analiză a efectelor

acestora asupra consumatorului de sistem. Această preocupare este pe deplin justificată și de certa actualitate din următoarele considerente:

- nu există un algoritm și o procedură sigură și general acceptată pentru identificarea, în timp real, a tipului și parametrilor golurilor de tensiune;
- consumatorii echivalenți au o comportare asemănătoare cu cea a motoarelor de inducție pentru care s-a demonstrat, în literatura de specialitate, că golurile de tensiune au câteva efecte nocive dintre care menționăm o creștere semnificativă a curentului pe durata golului de tensiune;
- necunoașterea comportării consumatorului echivalent poate conduce la declanșări defectuoase a protecțiilor liniilor radiale care alimentează acești consumatori;
- până în prezent nu există studii detaliate care să trateze efectele golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem.

Metodologia de analiză presupune dezvoltarea unor algoritmi care au drept scop modelarea golurilor de tensiune, modelarea consumatorului de sistem și în final analiza efectelor golurilor asupra consumatorului echivalent.

Teza de doctorat, extinsă pe 230 pagini, este structurată pe 7 capitole, 6 anexe și o listă bibliografică, și conține 74 figuri și 20 tabele. Lista bibliografică reunește 152 titluri de articole și cărți reprezentative publicate în țară sau străinătate. Se menționează și cele 14 lucrări proprii ale autorului elaborate în calitate de autor sau coautor.

Capitolul 1 are un caracter introductiv. El cuprinde actualitatea și justificarea tematicii care constituie obiectul tezei de doctorat, în contextul preocupărilor existente pe plan mondial și național și prezentarea pe scurt a conținutului fiecărui capitol. În încheiere se evidențiază atât modul de valorificare a rezultatelor cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat, cât și perspectivele și direcțiile ulterioare de continuare a cercetării.

Capitolul 2 prezintă un studiu bibliografic referitor la calitatea energiei electrice în general, precum și referitor la golurile de tensiune în particular. După definirea calității energiei electrice și după prezentarea principalelor standarde internaționale și naționale privind calitatea energiei electrice se trece la o prezentare selectivă a unor noțiuni generale privind golurile de tensiune cum ar fi: definiții ale golurilor de tensiune, cauze de apariție a lor, efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor, precum și metode de atenuare sau de eliminare a efectelor golurilor de tensiune. În finalul capitolului se prezintă principalele direcții de studiu în domeniul golurilor de tensiune precum și o prezentare a importanței acordate la nivel mondial acestui domeniu.

Capitolul 3 conține o metodă de analiză a calității tensiunii care are ca și scop prezentarea stadiului actual de analiză a calității tensiunii electrice precum și încadrarea golurilor de tensiune în acest domeniu. La începutul capitolului se prezintă câteva posibilități de clasificare a perturbațiilor electromagnetice care afectează calitatea tensiunii, după care se definesc nivelele de acceptabilitate pentru diferitele perturbații. În continuare se prezintă principalii indicatori ce caracterizează fiecare perturbație care afectează calitatea energiei electrice, dintre care se poate remarca inclusiv indicatorii golurilor de tensiune. Capitolul se încheie cu un studiu de caz realizat în cadrul unui contract de cercetare cu S.C. Electrica Banat [***2004c].

Capitolul 4 tratează mai amănunțit problema golurilor de tensiune. În prima parte se prezintă sintetic prevederile principalelor standarde din domeniul golurilor de tensiune. În continuare se prezintă două metode de clasificare și caracterizare a golurilor de tensiune, precizându-se avantajele și dezavantajele fiecărei metode. Ulterior s-au prezentat mai mulți algoritmi dezvoltați în literatura de specialitate care au drept scop identificarea caracteristicilor golurilor de tensiune înregistrate în rețeaua electrică de transport și distribuție a energiei electrice. Aceștia au fost testați pe mai multe înregistrări de goluri de tensiune realizate în diferite puncte ale rețelei electrice. În finalul capitolului se prezintă un nou algoritm, original, pentru determinarea caracteristicilor golurilor de tensiune obținute din înregistrări ale curbelor de tensiune, iar validarea acestuia se face prin compararea rezultatelor cu cele obținute cu ceilalți algoritmi prezentați în lucrare.

Capitolul 5 prezintă o metodă de considerare a consumatorilor complecși, pornind de la împărțirea acestora în două componente: una statică și una dinamică. Pentru a obține o mai bună echivalare a componentei dinamice, aceasta va fi considerată ca fiind de structura unui motor electric de inducție echivalent. Scopul capitolului este de a realiza un model matematic pentru analiza comportării consumatorilor complecși la perturbații de tensiune în general, respectiv la goluri de tensiune în particular. Pe baza modelului matematic se dezvoltă un algoritm care ține cont și de faptul că perturbația care poate afecta consumatorul complex poate produce o nesimetrie a sistemului de tensiuni. Verificarea modelului matematic se face prin simulare MatLab. Tot în acest capitol este prezentată o aplicație care utilizează modelul matematic pentru identificarea parametrilor consumatorilor echivalenți.

Capitolul 6 este dedicat integral dezvoltării unei metode de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex. Pentru dezvoltarea acestei metode s-a pornit de la concluziile și modelele matematice dezvoltate în capitolele anterioare. Suplimentar pentru validarea rezultatelor obținute, acestea sunt comparate cu situații reale, înregistrate la bornele consumatorului complex luat în considerare. Pentru a se putea compara rezultatele simulate cu cele înregistrate într-o situație reală este necesar prelucrarea semnalelor înregistrate pentru a fi aduse la o formă convenabilă procedurii de comparare. În finalul capitolului se prezintă rezultatele obținute cu ajutorul algoritmului de analiză propus. Pe întreg parcursul capitolului sunt prezentate componentele unui pachet de programe care au drept scop realizarea pas cu pas a tuturor etapelor propuse de algoritmul dezvoltat.

Capitolul 7 cuprinde concluziile generale ale tezei și prezentarea sistematizată a contribuțiilor originale ale autorului, precum și relieful direcțiilor și perspectivelor oferite de lucrarea de față pentru continuarea cercetărilor și aplicarea rezultatelor și a experienței obținute.

Rezultatele cercetării au fost valorificate în cadrul unor contracte de cercetare științifică încheiate între Universitatea „Politehnica” din Timișoara și S.C. Electrica Banat S.A. sau în cadrul unor programe naționale de cercetare derulate de Ministerul Educației și Cercetării: MENER, CEEX, RELANSIN. Până în prezent s-au derulat 5 astfel de contracte [***2004a], [***2004b], [***2004c], [***2004d],

[***2005], dintre care unul [***2005], a obținut în anul 2007 premiul III al Autorității Naționale pentru Cercetare Științifică.

De asemenea, cea mai mare parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate și sunt în curs de publicare. Se menționează faptul că din totalul de 14 lucrări proprii, 7 au fost publicate și prezentate în volumele unor manifestări științifice de prestigiu din străinătate [Balint2005], [Moga2007], [Moga2008b], [Moga2009], [Pană2007a], [Pană2007b], [Toader2005], iar două sunt în curs de publicare în volumele unor manifestări științifice de prestigiu din străinătate [Molnar2010a], [Molnar2010b].

În contextul progresului tehnicii de calcul și a IT-ului, studiul teoretic și practic realizat în cadrul tezei de doctorat conduce la recomandarea privind implementarea software a metodelor dezvoltate în cadrul acestei teze, în cadrul echipamentelor de monitorizare, automatizare și protecție a rețelelor electrice. Acest lucru este benefic atât din punct de vedere a monitorizării golurilor de tensiune care au loc în sistemul electroenergetic, cu aplicații diverse în studiul acestora, precum și pentru anticiparea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor din sistemul electroenergetic. În acest sens se impune o achiziție on-line de valori corespunzătoare tensiunilor în toate nodurile rețelei electrice precum și a curenților pe liniile radiale la bornele cărora se pot echivala consumatorii complecși. În final cu ajutorul acestor informații prelucrate conform celor dezvoltate în această lucrare se pot lua decizii privind proiectarea rețelei electrice și parametrizarea echipamentelor de automatizare și protecție.

2. ASPECTE ACTUALE ALE PROBLEMEI CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE. GOLURI DE TENSIUNE

În acest capitol se prezintă un studiu bibliografic referitor la calitatea energiei electrice în general, precum și referitor la golurile de tensiune în particular. După definirea calității energiei electrice și după prezentarea principalelor standarde internaționale și naționale privind calitatea energiei electrice se trece la o prezentare selectivă a unor noțiuni generale privind golurile de tensiune cum ar fi: definiții ale golurilor de tensiune, cauze de apariție a lor, efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor, precum și metode de atenuare sau de eliminare a efectelor golurilor de tensiune. În finalul capitolului se prezintă principalele direcții de studiu în domeniul golurilor de tensiune precum și o prezentare a importanței acordate la nivel mondial acestui domeniu.

2.1. Aspecte generale privind calitatea energiei electrice

Calitatea energiei electrice constituie o veche preocupare a energeticienilor. Într-o primă etapă, analize și măsurători privind regimul deformant, nesimetric și flicker urmau unor situații anormale în sistemul energetic [Albert1998]. În ultimele două decenii eforturile de studiere și cercetare a regimurilor deformante au sporit în mod continuu; s-au constituit mai multe grupuri mari atât sub colaborare cu producătorii cât și în colaborare cu marile lanțuri de transport și distribuție, dar și finanțate de marii utilizatori din industrie. Unele grupuri sunt formate la nivelul mai multor state care acordă o tot mai mare importanță calității energiei electrice, prin participarea la finanțarea acestor studii și cercetări desfășurate de către cei mai de seamă specialiști în domeniu.

Calitatea energiei electrice constituie o problemă complexă și controversată. Complexitatea ei rezidă din multitudinea de factori ce o condiționează, din interdependența acestora, din lipsa unor metode și mijloace de obținere expeditivă și mai ales precisă a informațiilor referitoare la unele mărimi ce o caracterizează [Buta2001]. În acest sens cercetătorii și-au canalizat eforturile în emiterea unor idei și conceperea unor metode de studiu care să aducă un progres cât mai rapid în rezolvarea problemelor necesare definirii cât mai precise a conceptului de calitate, cât și un aport din partea factorilor economici și chiar al statelor, de a dota aceste grupuri cu tehnică și aparatură specializată, necesară atât înregistrării fenomenelor perturbatoare, cât și în stocarea și prelucrarea datelor obținute prin aceste măsurători și înregistrări.

Problemele de calitate a energiei electrice, importante pentru funcționarea sistemelor energetice în ansamblu, au devenit în ultimii ani o problemă de o actualitate și o importanță deosebită mai ales datorită apariției unor consumatori din ce în ce mai performanți, dar în același timp, mai sensibili la anumite imperfecțiuni privind calitatea energiei electrice și mai ales la unele perturbații provocate de caracteristicile anumitor consumatori în raport cu principiul de funcționare și cu

variațiile de putere, care afectează în mod negativ calitatea energiei pentru restul consumatorilor.

Calitatea energiei electrice prezintă două aspecte: o calitate percepută de consumator, definită prin mărimi subiective și o calitate măsurată, evidențiată prin indicatori stabiliți pe criterii tehnice [Buta2001]. Există o percepție diferită referitor la calitate exprimată de producătorii de energie și similară cu a celor din domeniul transport-distribuție, dar în general contradictorie percepției consumatorilor, cea ce impune ca fiind mai obiectivă calitatea stabilită pe bază de măsurători și înregistrări a fenomenelor reale din sistemele de distribuție și utilizare a energiei electrice.

Data fiind importanța problemei și efectele ei tehnico-economice complexe, în prezent s-a trecut la o etapă nouă, de monitorizare permanentă a calității energiei electrice, de condiționare a racordării consumatorilor la rețea, de respectarea unor cote de perturbație admisibile, fixate de furnizorul de energie electrică, care urmărește respectarea nivelurilor de perturbație în punctele comune de conectare a consumatorilor [Albert1998].

Această situație a făcut ca în etapa actuală să existe o preocupare permanentă pentru calitatea energiei electrice, planificarea și monitorizarea acesteia, standardizarea emisiilor perturbatoare, stabilirea de niveluri de compatibilitate și a unor principii și metode care să contribuie la îmbunătățirea calității energiei atât pe plan internațional, european cât și în România.

În România, în perioada 1968-1988 s-au efectuat numeroase probe și măsurători la mari combinate metalurgice (Galați, Târgoviște, Slatina etc.) sau chimice (Borzești, Craiova, Făgăraș etc.), care au permis caracterizarea regimurilor de funcționare și stabilirea mijloacelor de combatere a fenomenelor periculoase sau neplăcute (montarea de filtre, compensatoare sincrone pentru combaterea fenomenului de flicker etc.) [Albert1998].

Pe baza studiilor efectuate de către specialiștii români și în concordanță cu normativele internaționale, ANRE a introdus cerințe de performanță și calitate, atât pentru furnizorii de energie electrică participanți la piața de energie, cât și consumatorilor industriali și similari racordați la rețelele publice [Albert1998].

Având în vedere forma specifică a curbei de sarcină a fiecărui consumator, apare necesitatea de monitorizare pe intervale mari de timp (uzual o săptămână) și o prelucrare statistică a datelor achiziționate. Informațiile obținute permit evaluarea consumatorilor din punctul de vedere al încadrării, cu o anumită probabilitate (de obicei 95%), pe durata de monitorizare, în limitele admise privind nivelul de perturbații transmise în rețeaua electrică de alimentare [Albert1998]. De asemenea s-au instituit în anumite puncte de distribuție, dar și pe lanțul de transport, puncte de măsurare și înregistrare a unor efecte perturbatoare, unde se pot monitoriza atât perturbațiile provocate dinspre producător spre consumator, dar și a perturbațiilor provocate de consumatori și transmise (datorită condițiilor de conectare) rețelilor de distribuție și care pot afecta alți consumatori conectați în rețeaua respectivă.

Există o permanentă grijă pentru studiul atât cantitativ cât și calitativ asupra producătorilor, pentru asigurarea unui nivel de producție a energiei optim în raport cu consumurile solicitate și studii privind structura rețelilor de transport și distribuție a energiei care să nu provoace pierderi sau distorsiuni ale curbelor curentului și tensiunii, prin subdimensionarea lor în raport cu consumul solicitat și să nu utilizeze aparatură de comandă, protecție și compensare necorespunzătoare calitativ sau cantitativ.

În paralel cu studiile aferente calității energiei electrice se desfășoară studii, cercetări și proiectări de noi echipamente și aparatură mai performantă, care să perfecționeze și să modernizeze pe cele existente, în sensul de a diminua la maximum

efectele perturbatoare induse prin modul de funcționare propriu, de a spori securitatea consumatorilor în raport cu perturbațiile apărute din rețea, dar și împotriva transmiterii unor perturbații proprii în rețeaua de alimentare.

Activitatea de cercetare asupra calității energiei electrice este canalizată, în majoritatea grupurilor formate în acest scop, spre analiza formei tensiunii sinusoidale de alimentare, a amplitudinii și frecvenței, fără a se neglija anumite efecte electromagnetice care pot provoca perturbații și care apar datorită unei variații foarte mari a intensității curentului specific variațiilor consumului înregistrat. De asemenea, se urmăresc și fenomenele induse de marii consumatori în raport cu tipul lor și specificul perturbațiilor provocate (consum asimetric pe fazele rețelei, inducții puternice care produc tensiuni inverse, goluri de tensiune, etc.). O importanță corespunzătoare se acordă și armonicilor induse în rețelele de alimentare cu energie electrică, deoarece acestea pot influența atât imperfecțiunile în funcționarea unor consumatori cât și distrugerea acestora în anumite situații, afectând sistemele informatice și de telecomunicații, devenite tot mai sensibile în raport cu calitatea sursei de alimentare.

2.2. Definiții ale calității energiei electrice

Calitatea energiei electrice a preocupat specialiștii din sectorul electroenergetic încă din primii ani ai utilizării, pe scară largă, a curentului alternativ, dar în ultimul deceniu s-a conturat o oarecare concentrare și colaborare a grupurilor de cercetători implicați în rezolvarea acestui deziderat.

În 1983 Meynaud [Meynaud1983] susținea: *calitatea energiei electrice distribuită de către producători poate fi caracterizată de doi factori: unul privind continuitatea distribuției, iar cel de-al doilea definind calitatea tensiunii*. Acest mod de a aprecia calitatea energiei s-a dovedit a fi incomplet, existând mai mulți factori perturbatori care influențează nivelul calității energiei.

În 1991 Heydt [Heydt1991] propune o interpretare a calității energiei electrice, definind în cartea sa, "Calitatea energiei electrice", acest termen, pornind de la amplitudinea și forma tensiunii sinusoidale în formă perfectă ca fiind nevoia de a menține nivelul tensiunii și frecvenței aproape de cele ideale.

În 1996 Dugan [Dugan2003] propune o definiție mai clară a problemelor calității energiei ca fiind *orice abatere a formei tensiunii, curentului sau frecvenței care determină nefuncționarea sau proasta funcționare a echipamentelor clientului*.

În 2001 Bhattacharya [Bhattacharya2001] propune o definiție mai completă și mai apropiată de problemele sistemelor electroenergetice pentru calitatea energiei. Astfel: *„Calitatea energiei este o combinație între calitatea curentului și calitatea tensiunii de alimentare implicând interacțiunea dintre sistemul de alimentare și consumatorii finali. Calitatea tensiunii are legătura cu deviația formei de undă a tensiunii de la cea sinusoidală perfectă cu amplitudine și frecvență constantă. Calitatea curentului este un termen complementar și are legătură cu deviația formei de undă a curentului de la cea sinusoidală perfectă cu amplitudine și frecvență constantă. Calitatea tensiunii atrage după sine performanța sistemului electric în raport cu consumatorul, în timp ce calitatea curentului implică comportamentul consumatorului în raport cu sistemul de alimentare cu energie”*.

Tot în 2001, Buta [Buta2001] adopta următoarea definiție: *calitatea energiei electrice se poate defini ca fiind ansamblul parametrilor (indicatorilor) care condiționează utilitatea energiei electrice, adică satisface necesitățile receptorilor (consumatorilor electrici) în concordanță cu destinația lor*.

În prezent, calitatea energiei electrice constituie o preocupare majoră atât pentru furnizori, cât și pentru consumatorii de energie electrică, în acest scop încercându-se o standardizare a termenului de calitate a energiei electrice, dar încă nu s-a putut obține o definiție unanim acceptată. Astfel în prezent putem găsi în literatura de specialitate mai multe definiții și mai multe concepte de rezolvare a problemelor aferente acestui termen.

Datorită faptului că energia electrică reprezintă o marfă, calitatea ei poate fi încadrată într-un concept mai general legat de activitatea de producere a ei, și ca urmare noțiunii de calitate, i se poate atribui peste o sută de definiții fără a identifica printre ele una unanim acceptată [Buta2001].

O altă încadrare a calității energiei electrice poate avea în vedere particularitățile activității de producere a energiei electrice față de celelalte produse ale economiei: continuitatea producției de energie, universalitatea energiei, interschimbabilitatea tipurilor de energie, particularitățile ce rezidă în procesul de transport și distribuție, etc. [Buta2001].

În continuare se va prezenta câteva dintre definițiile utilizate de organizațiile naționale și internaționale.

Astfel conform Organizație Internațională de Standardizare – ISO calitatea energiei electrice este definită ca fiind: *totalitatea caracteristicilor și a particularităților unui produs sau serviciu, care concretizează aptitudinea de a răspunde la necesități potențiale sau exprimate ale utilizatorului.*

O altă definiție a fost dată de IEEE [1100-1999]. Calitatea energiei electrice reprezintă "*conceptul alimentării și legării la pământ a echipamentelor sensibile, într-un mod care să permită funcționarea corectă a acestora*".

IEC (Institute of Electrical and Electronics) [61000-4-30] a adoptat în locul termenului de calitate a energiei electrice conceptul de compatibilitate electromagnetică, definit astfel: *aptitudinea unui echipament sau sistem de a funcționa satisfăcător în mediul său electromagnetic, fără a induce perturbații inacceptabile în orice alt echipament sau sistem existent în acel mediu.*

În Franța și în diferite publicații europene termenul de calitate a energiei electrice se referă la *abaterile formei curbei de variație în timp a tensiunii de la sinusoida ideală.*

Normele franceze privesc calitatea energiei electrice ca fiind de fapt calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică, care este condiționată de următorii trei factori:

- siguranța în funcționare a instalațiilor de alimentare;
- calitatea energiei electrice în punctul de delimitare dintre consumator și furnizor;
- compatibilitatea electromagnetică a instalațiilor, cu mediul în care funcționează, în punctul comun de racord [Iordache1997].

Din toate aceste definiții se poate observa efectele pe care le are calitatea energiei, în special asupra consumatorilor care utilizează în procesul de producție tehnologii moderne, bazate pe sisteme de control automat, flux tehnologic dezvoltat, reglare adaptivă utilizând convertoare statice de putere.

Încercarea de a defini calitatea energiei electrice prin astfel de idei și concepte s-a dovedit a fi incompletă și nu ar putea rezolva problemele specifice care incomodează atât pe cei care produc și distribuie energia electrică, cât și pe cei ce utilizează această energie și mai ales pe acei utilizatori ce folosesc echipamente conforme cu ultimele realizări tehnice și tehnologii noi, care comportă un risc major în cazul unor perturbații de un anumit nivel în sisteme de alimentare cu energie.

2.3. Standardizarea calității energiei electrice

2.3.1. Necesitatea standardizării

Până în anii 1970, deși au existat studii și cercetări ale perturbațiilor existente în producerea, distribuția și utilizarea energiei electrice, atât asupra cauzelor cât și efectelor acestora, activitatea de reglementare în acest domeniu, la nivelul țărilor a fost slabă, cu toate că existau recomandări suficient de clare în acest sens. Acțiunea de reglementare în domeniul calității energiei electrice s-a accentuat începând cu anii 1970 din cauza problemelor deosebite apărute în sistemele de energie electrică, cauzate de perturbații provocate de echipamentele necorespunzătoare, dar și de diversificarea tipurilor de consumatori și de numărul acestora. Reglementarea în domeniul calității energiei electrice a cunoscut o dinamică pozitivă în următorii ani și până în prezent.

În 1983, Popescu lansează propunerea pentru îmbunătățirea standardelor de calitate a energiei electrice având ca bază noile studii și cercetări realizate în perioada anterioară, propunere preluată și de alte țări pentru a-și revizui propriile reglementări în acest domeniu. Propunerea viza ca problema de bază în definirea calității energiei să fie distorsiunile tensiunii electrice. El a folosit aparate de înregistrare a formei tensiunii precum și un software pentru analiza acestor forme [Popescu1983].

În 1986, Compania de Electricitate Duke lansează o politică privind perturbațiile sistemelor energetice. Politică respectivă identifică metode prin care compania poate lucra împreună cu clientul pentru rezolvarea acestor perturbații. Cele mai importante elemente folosite au fost monitorizarea și investigarea calității tensiunii [Dagenhart1987].

În anii '80 în Franța [Fouilloux1991] s-au demarat programe de monitorizare a energiei livrată și a efectelor asupra satisfacției clienților pe termen lung, pentru a se obține informații prin măsurători directe asupra calității energiei electrice. S-a creat aparatura specifică necesară urmării distorsiunilor apărute în sistem, atât datorită producătorilor, transportatorilor, distribuitorilor, cât și a consumatorilor, astfel încât să existe o bază reală pentru a stabili măsurile necesare în existența unei calități cât mai ridicate care să satisfacă nevoile și pretențiile consumatorilor, care devin tot mai sensibili.

În 1989 în SUA Hairadebian prezintă un sistem creat pentru a monitoriza perturbațiile curentului în cele mai importante locații din țară cu scopul de a fi transmise unui computer și apoi studiate și analizate printr-un software special. Pe parcursul a câțiva ani prin Laboratorul Național de Electricitate din SUA s-au efectuat măsurători și înregistrări în zeci de locații pe o arie geografică mare din SUA și Canada, rezultând aproximativ 2000 de perturbații semnificative lunar ce puteau fi analizate conform programului [Dorr1992].

Începând cu 1991 Asociația de Electricitate din Canada [Koval1996] a luat inițiativă de a dezvolta un proiect pe trei ani, pentru analiza calității energiei electrice din rețeaua electrică canadiană. Rezultatele studiului furnizează cunoștințele de bază pentru crearea și utilizarea de tehnologii pentru micșorarea numărului și efectelor golurilor de tensiune.

În prezent toate țările dezvoltate sau în curs de dezvoltare au ca și activitate principală de cercetare în domeniul energiei electrice, studiul calității energiei electrice.

2.3.2. Standarde românești și internaționale

În urma analizelor calității energiei electrice, România a hotărât să acționeze în sensul de îmbunătățire a situației reglementărilor și să contribuie la dezvoltarea standardelor naționale și internaționale. S-a trecut la monitorizarea permanentă a valorilor tensiunilor, golurilor de tensiune și întreruperilor scurte, precum și selectarea nodurilor în care valoarea limită a coeficientului de asimetrie este mai mare de 2% și coeficientul de distorsiune mai mare de 80%, revizuire standardul PE 142/80, care reglementa calitatea energiei electrice.

Odată cu apariția echipamentelor moderne, care utilizează sau care sunt folosite în procesele de producere și distribuție a energiei electrice, a apărut și necesitatea de a avea o calitate superioară a energiei. Au apărut concluzii care specificau că responsabilitatea de a asigura condițiile necesare păstrării parametrilor de calitate a energiei electrice, de la producător la consumatorul final, revine întregului sistem și deci este nevoie de o colaborare corespunzătoare în lanțul producător-consumator pentru a diminua efectele ce dăunează calității energiei. Prin urmare, fiecare participant în acest lanț este direct interesat în a proteja întregul sistem de efectele perturbatoare specifice activității proprii. Ar fi necesar în acest sens, realizarea unor contracte clare, prin care părțile implicate își asumă responsabilități asupra calității energiei și a păstrării acesteia în parametrii optimi, dar și un acord în a defini indicatorii de calitate optimi, pe care fiecare parte are obligația de a-i monitoriza permanent.

În multe țări, inclusiv din Europa, există anumite reglementări (apărute în general în ultimele două decenii) prin care, atât producătorii și transportatorii, cât și distribuitorii și consumatorii mari și individuali, sunt obligați să respecte anumite condiții ce au scop menținere calității energiei electrice.

În România s-a emis un standard SR EN 50160/1998 care este aliniat la standardele Uniunii Europene și prin care s-a stabilit modul în care consumatorii de energie electrică influențează calitatea energiei electrice. În România definirea calității energiei electrice se face în reglementări:

- STAS 930/1975 – stabilește tensiunile nominale și abaterile admisibile ale tensiunii față de aceste valori;
- PE 124/1995 – reglementează variațiile rapide și nesimetria tensiunii;
- PE 109/1992 – reglementează supratensiunile și protecția instalațiilor împotriva acestora;
- PE 142/2001 – reglementează unele aspecte privind flicker-ul;
- PE 143/1995 – tratează regimurile nesimetric și deformant.

Standardele de imunitate impun niveluri de perturbații pe care echipamentul ar fi capabil să le tolereze fără a induce defecte sau întreruperi în funcționare.

În mod special ar trebuie subliniat faptul că performanța echipamentului poate fi afectată, dacă acesta este supus unor condiții de alimentare mai severe decât cele specifice în standardul său de produs [SREN50160/2003].

După 1990 activitatea de reglementare a cunoscut un elan deosebit, datorat studiilor și cercetărilor efectuate în întreaga lume privind cauzele și efectele perturbațiilor din sistemul electroenergetic, precum și concluziilor și recomandărilor rezultate din acestea.

IEC a prezentat un standard de compatibilitate electromagnetica (IEC 61000-1990), care acoperă aproape toate problemele ce privesc calitatea energiei. Acest document conține șase părți: General, Mediu ambiant, Limite, Tehnici de testare și măsurare, Manuale de instalare și reducere a efectelor, respectiv, Standarde generice.

Astfel au apărut o mulțime de standarde cu o arie de aplicabilitate tot mai largă în domeniul calității energiei electrice. Spre exemplificare se trec în revistă cele mai importante standarde emise de către IEEE:

- ANSI/IEEE Std 519-1981 "IEEE guide for harmonics control and reactive compensation of static power converters"
- IEEE Std C57.18-10-1998 "IEEE standard practices and requirements for semiconductor power rectifier transformers"
- IEEE Std C62.48-1995 "IEEE guide on interactions between power system disturbances and surge-protective devices"
- IEEE Std 493-1997, "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", Appendix N
- IEEE Std 493-1997, "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", Chapter 9
- IEEE Std 519-1992, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems"
- IEEE Std 1100-1999, "IEEE recommended practice for powering and grounding electronic equipment"
- IEEE Std 1124-2003 "IEEE guide for the analysis and definition of DC-side harmonic performance of HVDC transmission systems"
- IEEE Std 1159-1995, "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality"
- IEEE Std 1159.3-2003 "IEEE recommended practice for the transfer of power quality data"
- IEEE Std 1250-1995 "IEEE guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances"
- IEEE Std 1346-1998 "IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment"
- IEEE Std 1531-2003 "IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters"
- IEEE Std 1564 draft 6, "Recommended Practice for the Establishment of Voltage Sags Indices"

2.4. Goluri de tensiune. Chestiuni generale

În timpul exploatării sistemelor electroenergetice, chiar și a celor mai bine echipate și exploatate, vor apărea inevitabil perturbații de scurtă durată ale valorii tensiunii, pe una sau mai multe faze, manifestate prin:

- variații bruște de tensiune datorate unor defecte cu caracter rapid trecător sau eliminate prin protecții;
- variații bruște produse de șocuri de putere cu caracter pasager;
- dispariții scurte ale tensiunii ca urmare a funcționării automatizărilor de sistem (a instalațiilor de anclanșare automată a rezervei – AAR, sau a celor de reanclanșare automată rapidă – RAR).

Perturbațiile de scurtă durată ale valori tensiunii sunt caracterizate prin aceea că există o revenire la valorile inițiale sau la valori apropiate de acestea, ca urmare a dispariției cauzei perturbatoare, spontan sau prin acțiunea echipamentelor de protecție și automatizare. De fapt, limita de timp care permite demarcarea perturbațiilor de scurtă durată de cele considerate de lungă durată, este în general tocmai timpul necesar protecțiilor, automatizărilor și echipamentelor de comutație pentru a restabili tensiunea normală, dacă acest lucru este posibil.

În condițiile actuale existente la noi în țară se consideră că pentru această limită de demarcare se poate adopta valoarea de *trei secunde* (în sisteme performante chiar o secundă).

Perturbațiile de scurtă durată, principial, pot fi provocate prin modificări bruște și trecătoare ale:

- impedanțelor transversale ale rețelei (scurtcircuite, puneri la pământ ale unei faze, șocuri de putere absorbită de consumatori);
- impedanțelor longitudinale ale rețelei (întreruperi ale fazelor rețelei, funcționarea AAR sau RAR, etc.).

În primul caz nu se produc desincronizări între receptoare și surse (pierderi de stabilitate) pe când în cel de-al doilea caz aceste desincronizări apar frecvent. Perturbațiile din primul caz care conduc la scăderi ale tensiunii constituie categoria *golurilor de tensiune* iar cele din al doilea caz, care conduc la dispariții ale tensiunii, constituie categoria *microîntreruperilor și a întreruperilor scurte*.

Pentru aceasta este necesar ca sistemul electroenergetic să asigure ca perturbațiile de scurtă durată să aibă caracteristici cât mai ușor de suportat de către consumatori, iar aceștia să aibă instalații de utilizare cât mai insensibile la acest gen de fenomene. O siguranță mărită în funcționare a consumatorilor, presupune deci o bună cunoaștere și corelare, încă din faza de proiectare, între caracteristicile perturbațiilor de scurtă durată ale tensiunii și performanțele tehnice ale instalațiilor de utilizare.

Altfel zis prin *gol de tensiune* se înțelege o scădere bruscă, de scurtă durată, a amplitudinii sau a valorii efective a tensiunii, într-un interval cuprins între două șocuri de tensiune consecutive de sens contrar, interval în care tensiunea este în permanență inferioară valorii sale nominale.

Un gol de tensiune este o reducere între 10% și 90% a valorii efective a tensiunii pe o durată scurtă de timp (de la 0.5 perioade până la 1 minut).

În România, prin gol de tensiune se înțelege o variație negativă a valorii efective a tensiunii unei rețele, având o amplitudine cuprinsă între o valoare minimă sesizabilă de aproximativ 20% U_N și 100%, durata variației de tensiune fiind de cel mult 3 secunde. Menționăm că în România, căderile de tensiune de amplitudine 100% U_N precum și situațiile eliminate prin sistemele automate (AAR, RAR și DAS), nu sunt considerate întreruperi în alimentare.

2.4.1. Cauzele de apariție a golurilor de tensiune

Majoritatea golurilor de tensiune se produc datorită unor defecte apărute în instalațiile de producere, transport, distribuție și utilizare a energiei electrice. Aceste defecte sunt urmările unor cauze naturale (descărcări atmosferice, furtună, viscol, chiciură, etc.) sau de altă natură (uzură înaintată sau calitate necorespunzătoare a materialelor și echipamentelor, grad ridicat de poluare, manevre greșite, etc.). O categorie aparte de goluri de tensiune o constituie cele care au drept cauză conectările directe la rețea ale unor agregate cu curenți de pornire mari.

Fenomenele care stau la originea golurilor de tensiune mai pot fi împărțite și în funcție de locul de producere:

- rețeaua electrică a furnizorului;
- rețeaua electrică (instalația) utilizatorului.

Cauze localizate în rețeaua electrică a furnizorului

Este vorba în principal de scurtcircuite, produse printr-o mare varietate de moduri: străpungerea sau conturnarea izolației unui echipament, supratensiuni de comutație sau atmosferice, etc.

Golul de tensiune se produce datorită pierderilor de tensiune produse într-o zonă de rețea, mai mult sau mai puțin întinsă în jurul punctului de origine al defectului, înainte de scoaterea din funcțiune a elementului defect de către protecții.

Acestea din urmă au comportamente diferite în funcție de tipul de element de rețea pe care îl protejează. Astfel de exemplu, apariția unui defect într-un transformator de IT/MT, conduce la scoaterea acestuia din funcțiune după $1,5 \div 2$ s de la apariția defectului, pe când dacă se produce un scurtcircuit într-un cablu de IT, scoaterea acestuia din funcțiune se va produce după câteva zecimi de secundă de la începutul scurtcircuitului. În fiecare caz, scoaterea din funcțiune a elementului defect se consideră realizată numai după declanșarea întreruptorului aferent.

Problema se pune însă diferit pentru liniile electrice aeriene. În cazul acestora, arcul electric din punctul de defect poate fi adesea eliminat prin întreruperi de scurtă durată a tensiunii (dacă de exemplu scurtcircuitul se produce prin conturnarea izolației). Acestea sunt realizate de către echipamente de automatizare de tip RAR, care sunt asociate sistemelor de protecție și care, prin limitarea duratei întreruperii, atenuează repercusiunile defectelor asupra rețelei și asupra instalațiilor utilizatorilor.

Pentru o mai bună înțelegere a corelației dintre funcționarea diferitelor tipuri de sisteme de protecție și formarea golurilor de tensiune, în cele ce urmează se va face o foarte succintă prezentare a funcționării sistemelor de protecție ale liniilor electrice.

Pentru rețeaua de transport ($U_n > 110\text{kV}$), în care neutrul este legat la pământ, se folosesc protecții de distanță. Pentru acestea, timpii de declanșare normală sunt de aproximativ 0,2s în cazul defectelor „văzute” în treapta întâia, respectiv de 0,7s pentru cele din treapta a doua (în unele cazuri este posibilă reducerea acestui al doilea timp la 0,4s). De asemenea se folosesc dispozitive de reanclanșare automată lentă, fie monofazate ($1,5 \div 2$ s) fie trifazate (4s), funcționarea acestora din urmă fiind condiționată, în cazul unui defect polifazat, de un control al sincronismului.

Pentru rețelele de distribuție de MT, la care neutrul este pus la pământ prin intermediul unui rezistor („tratat” prin rezistor de limitare), rolul acestuia fiind de a limita curentul prin neutrul transformatorului (de obicei la valoarea de 300 A), fazele funcționării automatizării sunt în general următoarele:

- declanșare – reanclanșare trifazată rapidă (întrerupere de ordinul 0,3s – pauza RAR), prima declanșare având loc la 0,1-0,2s după apariția defectului;
- dacă defectul persistă, declanșare – reanclanșare trifazată lentă (întrerupere între 15-20s), a doua declanșare având loc după 0,5-1,5s de la reapariția defectului;
- în cazul persistenței defectului, declanșare trifazată definitivă până la terminarea intervenției, această a treia declanșare având loc la 0,5-1,5s după ultima apariție a defectului.

În rețelele de MT cu neutrul izolat sau tratat cu bobină de stingere (Petersen), punerile la pământ monofazate, având în cea mai mare parte caracter trecător (se produc prin conturnarea izolației), nu conduc la producerea unor curenți de scurtcircuit. Linia electrică respectivă poate rămâne un anumit timp în funcțiune, perioadă în care consumatorii trifazați (alimentați între faze) nu simt punerea la

pământ. Evident că scurtcircuiturile polifazate vor conduce la cicluri RAR rapide sau lente, care vor fi întotdeauna resimțite de către utilizatori.

În general acțiunea automatizărilor RAR provoacă cicluri complexe de goluri de tensiune și întreruperi, resimțite diferit în rețea în funcție de amplasarea punctului de observare. Amplitudinea zonei afectate de golurile de tensiune este funcție de nivelul de tensiune la care se produce defectul. Astfel, un scurtcircuit într-o rețea de tensiune superioară (de exemplu 220kV), va avea repercusiuni pe zone foarte extinse, asupra rețelelor de tensiuni inferioare alimentate din aceasta. În schimb, un scurtcircuit într-o rețea de tensiune inferioară, de exemplu de 20kV, afectează mai grav sau mai puțin grav rețeaua respectivă, în funcție de valoarea impedanței de defect, dar are o repercusiune redusă asupra rețelei de tensiune superioară din amonte, în funcție de impedanțele liniilor și transformatoarelor intercalate în serie între cele două rețele.

Cauze localizate în instalația utilizatorului

Un utilizator poate să producă el însuși goluri de tensiune în propria instalație, în absența oricărei perturbații în rețeaua de alimentare. Aceste goluri de tensiune se produc ca urmare a acționării uneia dintre următoarele cauze:

- scurtcircuitate în rețeaua internă;
- funcționarea unor instalații cu sarcină fluctuantă;
- exploatarea unor instalații ce au un curent mare la pornire.

2.4.2. Efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor de energie electrică

Pentru activitățile de tip casnic sau similare acestora, neplăcerile suportate la apariția golurilor de tensiune se manifestă, cu excepția unor cazuri particulare, prin pierderi de timp și mai rar prin pagube materiale.

Nu se poate spune același lucru și despre consumatorii industriali, care se pot clasifica din punct de vedere al efectelor golurilor de tensiune asupra instalațiilor industriale și a produselor fabricate, în trei mari categorii [Buta2001]:

Prima categorie: consumatorii pentru care o absență intempestivă de scurtă durată a tensiunii nu antrenează nici o pagubă materială, nici asupra produsului fabricat, nici asupra instalațiilor de producție, în general acestea putându-se repune în funcțiune imediat ce tensiunea de alimentare a revenit la normal. În acest caz, singurul inconvenient constă în pierderea de timp, mai ales că uneori durata întreruperii funcționării este mult mai mare decât a golului de tensiune ce a provocat oprirea unei instalații, pentru că, în funcție de natura instalației și a protecțiilor acesteia, nu este întotdeauna posibilă repunerea imediată în funcțiune.

A doua categorie: consumatorii pentru care o absență intempestivă de scurtă durată a tensiunii nu are nici o influență asupra instalațiilor de producție, dar provoacă pagube produsului fabricat. În unele cazuri, repunerea în funcțiune necesită efectuarea de numeroase operații a căror durată poate fi de câteva ore, deci foarte mare în comparație cu a unui gol de tensiune.

A treia categorie: consumatorii pentru care golurile de tensiune pot produce pagube materiale atât pentru instalațiile de producție cât și pentru produsele fabricate.

Un gol de tensiune produce întotdeauna modificări ale regimului staționar normal de funcționare, ceea ce conduce la apariția unor regimuri de funcționare tranzitorii. Variațiile mărimilor de stare pe durata regimurilor tranzitorii pot avea diferite efecte, care se pot caracteriza prin următoarele aspecte: pierderea

stabilității funcționării, creșterea solicitărilor termice datorită supracurenților care apar pe intervalul proceselor tranzitorii, creșterea solicitărilor produse de forțele electrodinamice ca urmare a șocurilor de curent, apariția unor suprasolicitări mecanice produse de șocuri de cuplu sau accelerații mari în cazul sistemelor de acționări electrice, afectarea serviciilor auxiliare, ca de exemplu pierderea presiunii uleiului de ungere sau a debitului fluidelor de răcire, afectarea mărimilor de ieșire și deci înrăutățirea calității serviciilor utile[Buta2001].

Pentru a evalua efectele golurilor de tensiune asupra instalațiilor de utilizare a energiei electrice, trebuie considerate individual principalele tipuri de receptoare care au un comportament caracteristic: contactoarele, motoarele sincrone și asincrone, sistemele pe bază de electronică de putere, calculatoarele numerice, instalațiile de iluminat.

Efectul golurilor de tensiune asupra contactoarelor

Fiind alimentate în general în curent alternativ, contactoarele declanșează atunci când în circuitul lor de comandă se produce un gol de tensiune a cărui amplitudine atinge aproximativ 30% din tensiunea nominală și a cărui durată este de ordinul a câtorva sutimi de secundă.

Temporizarea declanșării lor, pentru durate sub 1s, se poate realiza în două variante:

- alimentarea contactoarelor de la o sursă de energie în curent alternativ autonomă (de exemplu grup motor-alternator cu volant de inerție care alimentează și alte instalații sensibile la goluri de tensiune);
- înlocuirea bobinelor de curent alternativ cu bobine de curent continuu, la bornele cărora se plasează condensatoare; circuitul de curent continuu este alimentat din rețeaua de curent alternativ prin intermediul unui redresor.

Dacă este necesară obținerea unei durate de temporizare mai mari de 1s, bobinele contactoarelor se vor racorda la un circuit specializat, care poate fi (a se vedea Fig.2.2):

- de curent alternativ, alimentat printr-un invertor de la o baterie de acumulare (Fig.2.2, S2);
- de curent continuu, alimentat de la un redresor prevăzut cu baterie tampon (Fig.2.2, S3).

Efectul golurilor de tensiune asupra motoarelor electrice

Principalul efect negativ al golurilor de tensiune asupra motoarelor electrice constă în „desprinderea” acestora. Înainte de a expune în mod succint cauzele posibile de desprindere a motoarelor sincrone și asincrone, trebuie amintit că acestea, în funcție de importanță, sunt echipate cu dispozitive auxiliare, dintre care fac parte una sau mai multe dintre următoarele:

- aparat de comutație (contactor sau întreruptor);
- sistem de ungere și ventilație;
- protecții (minimale de tensiune și maximele de curent), temporizate sau nu;
- aparat de măsurare a temperaturii și dispozitiv de temporizare;
- sistem de pornire (automat sau nu);
- dispozitiv de excitație (pentru motoare sincrone, incluzând sistemul de protecție și control al acestuia).

Astfel, desprinderilor cauzate de apariția golurilor de tensiune în rețeaua de alimentare, li se adaugă opririle provocate de declanșările intempestive ale circuitelor auxiliare sau de funcționarea incorectă a protecțiilor.

Câteva considerații asupra fenomenului de desprindere a motoarelor sincrone și asincrone, se vor face în cele ce urmează.

Cazul motorului sincron:

La acest tip de motor, curenții circulând prin înfășurările statorului, induc în întrefier o tensiune magneto-motoare ce se rotește cu turația de sincronism. Prin interacțiunea dintre câmpurile electromagnetice rotative ale statorului și rotorului (ale cărui înfășurări sunt alimentate în curent continuu) se produce rotația rotorului cu turația de sincronism.

Decalajul dintre axa tensiunilor magnetomotoare rotative și cea a rotorului crește atunci când:

- la tensiune constantă, cuplul rezistent al mașinii antrenate crește;
- la cuplu rezistent constant, tensiunea de alimentare a motorului scade.

Dacă, datorită unei variații brutale a amplitudinii tensiunii, decalajul electric depășește valoarea de aproximativ 90° , motorul își pierde sincronismul: se produce așa numita *ruptură a stabilității dinamice*. Fazorul tensiunii contraelectromotoare a mașinii alunecă în raport cu cel al tensiunii rețelei și există pericolul apariției unor supracurenți importanți dacă protecțiile nu declanșează rapid.

Condițiile de ruptură a stabilității dinamice depind în principal de caracteristicile motorului, de cele ale excitației și de inerția rotorului (o creștere a inerției conduce la o creștere a stabilității).

Cazul motorului asincron:

Pentru motorul asincron, problema stabilității dinamice este în principal o problemă de echilibru a cuplurilor.

La apariția unui gol de tensiune, cuplul motor scade brusc de la valoarea inițială la o valoare mai mică. Turația ansamblului motor-mașină antrenată se va micșora și la restabilirea tensiunii cuplul motor crește brusc la o valoare mai mare. Motorul nu va putea accelera astfel încât să-și reia turația normală numai dacă noul cuplu motor va fi mai mare decât cuplul rezistent.

Este însă necesară adăugarea unei restricții: diferența între cuplul motor și cuplul rezistent trebuie să fie suficient de mică astfel încât revenirea la regimul staționar inițial să se facă fără supraîncălzirea inadmisibilă a înfășurărilor.

Trebuie de asemenea remarcat că între sistemul electroenergetic, (presupus de putere infinită) și motor, sunt intercalate impedanțele echivalente longitudinale ale liniilor și transformatoarelor. Pentru că tensiunea de alimentare redevine normală, supracurentul absorbit de motor poate provoca o cădere de tensiune relativ mare pe aceste impedanțe ceea ce poate face ca revenirea la regimul normal să fie imposibilă, deoarece cuplul motor este inferior celui corespunzător tensiunii nominale. Acest fenomen se poate produce mai des în instalațiile ce alimentează mai multe motoare. În acest caz, o soluție pentru evitarea opririi cel puțin a motoarelor importante, constă în reglarea corespunzătoare a protecțiilor, astfel ca, la apariția unor anumite goluri de tensiune, de durată și amplitudine convenabil stabilite, să declanșeze anumite motoare.

Ca și în cazul motorului sincron, o creștere a inerției ansamblului rotoric ajută la menținerea stabilității dinamice. În cazul motoarelor asincrone cu rotorul bobinat, la apariția unor goluri de tensiune de amplitudine și durată bine determinate, există în plus posibilitatea cuplării automate a unor rezistențe în serie cu circuitul rotoric sau repunerii automate a reostatului de pornire în poziția de pornire. Astfel, cuplul motor maxim se deplasează spre turații mai mici la aceeași

tensiune de alimentare, crescându-se totodată în mod artificial impedanța directă a motorului la turația respectivă, ceea ce limitează curentul de repornire.

Anularea tensiunii de alimentare a unui motor sincron sau asincron, prin deschiderea pentru scurtă durată a contactorului aferent, nu conduce la suprimarea instantanee a tensiunii la bornele acestora. Amplitudinea și faza acestei tensiuni reziduale se modifică în timpul întreruperii tensiunii de alimentare astfel că, dacă contactorul este reanclanșat imediat ce tensiunea de alimentare a redevenit normală, se produce un supracurent a cărui valoare depinde de defazajul și diferența de amplitudine ale celor două tensiuni: a rețelei, respectiv cea reziduală de la bornele mașinii. Acest curent provoacă o încălzire suplimentară și eforturi electrodinamice în bobinaje, care pot fi periculoase.

Ca regulă generală (cu excepția unor cazuri speciale), nu trebuie efectuată o reanclanșare rapidă a unui motor sincron. Pentru motoarele asincrone (cu rotorul în colivie sau bobinat), de construcție recentă, nu este permisă reanclanșarea decât dacă tensiunea reziduală este mai mică de 20% din tensiunea nominală (controlul acestei tensiuni se poate realiza printr-un releu de tensiune minimă). În cazul motoarelor vechi, este riscantă reanclanșarea directă, fără utilizarea unei repuneri automate a dispozitivelor auxiliare în poziția de pornire.

Efectul golurilor de tensiune asupra calculatoarelor numerice

Calculatoarele sunt acum esențiale pentru toate activitățile fie ca stații de lucru, ca servere de rețea sau sisteme de control în industrie. Ele sunt indispensabile în orice operație de prelucrare a datelor la tranzacții și la numeroasele funcții de comunicații, ca cele din sistemele de mesagerie electronică și cutie vocală. Introducerea calculatoarelor a pus în evidență, pentru prima dată, amploarea problemei golurilor de tensiune (de fapt, cele mai multe probleme de calitate a energiei electrice). Primele echipamente au fost afectate de defectări aparent aleatoare ceea ce a necesitat un efort de mentenanță considerabil. În acest scop s-au realizat curbele de acceptabilitate CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*) din Fig.2.1.a și SEMI (*Semiconductor Equipment and Materials International Group 1998*) din Fig.2.1.c. O altă curbă de acceptabilitate derivată din cele două este cunoscută în prezent sub denumirea de curba ITIC (*Information Technology Industry Council*) (Fig.2.1.b) [Eremia2006].

2.4.3. Metodele și mijloacele de atenuare sau de eliminare a efectelor golurilor de tensiune

Majoritatea instalațiilor și agregatelor industriale, au în componența lor trei categorii principale de elemente:

- aparatajul de comutație pentru punerea sau scoaterea din funcțiune și dispozitivele de protecție aferente (contactoare, întreruptoare, etc.);
- aparatura de control (regulatoare de viteză, detectoare de eroare, etc.);
- receptoarele principale (motoarele principale, cuptoarele, etc.).

Primele două categorii de elemente absorb pentru funcționare o putere în general redusă în raport cu cea absorbită de către cea de-a treia, însă au o inerție mult mai mică decât a acesteia. Se poate deci considera că repercusiunile perturbațiilor electrice asupra instalațiilor industriale au două niveluri diferite.

Primul nivel este cel al sistemului de control al unei mașini sau proces, care cuprinde și aparatajul de comutație. Pentru acest nivel, în care consumul de energie și inerția sunt aproape întotdeauna reduse, sensibilitatea la goluri de tensiune este

mare. Este deci necesară găsirea unei modalități de asigurare a unei alimentări stabile a sistemului sau de "inhibare" a acestuia în timpul perturbației tensiunii.

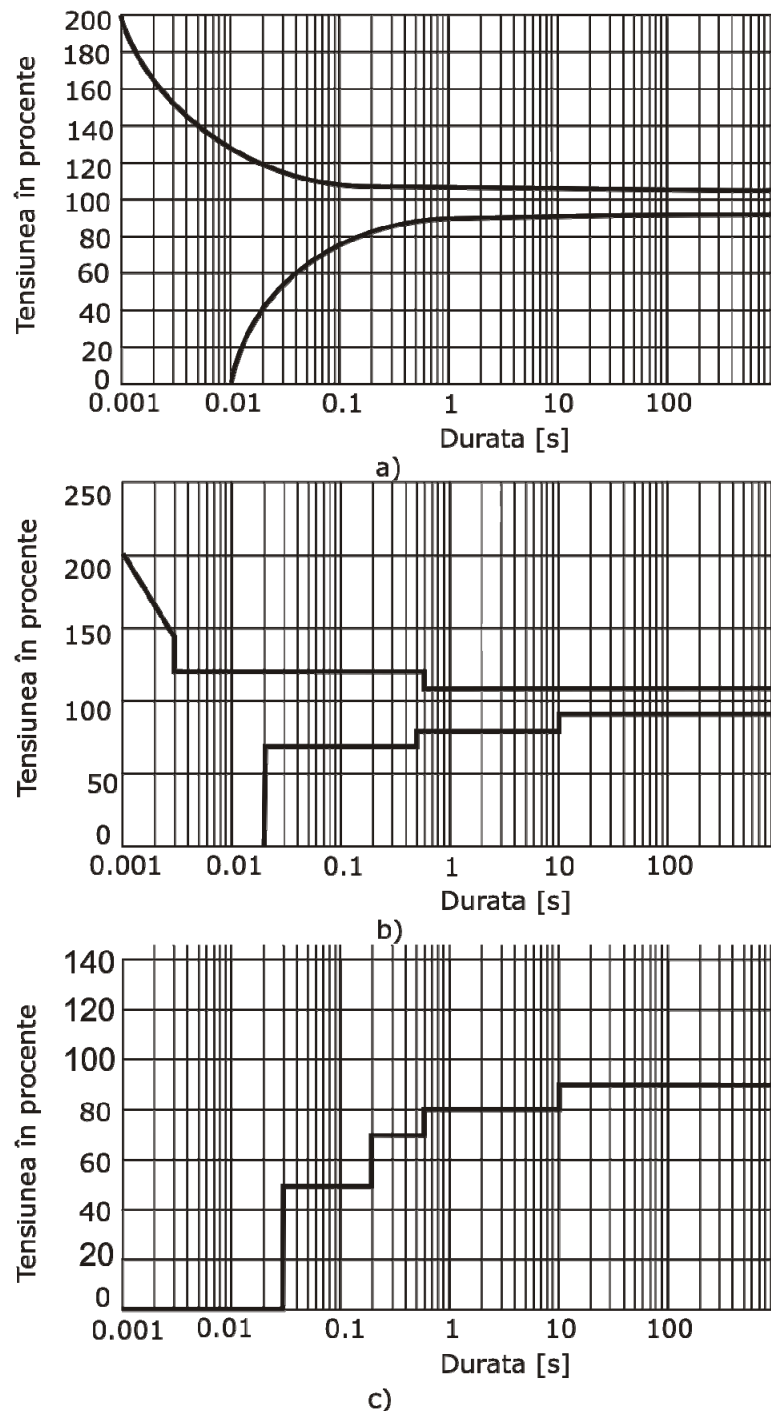


Fig.2.1. Curbele de acceptabilitate a echipamentelor: a) CBEMA, b) ITIC, c) SEMI.

În cazul celui de-al doilea nivel, cel al receptoarelor principale, consumul de energie și inerția sunt în general importante. Adesea, datorită acestei inerții, mașinile sunt mai puțin sensibile la goluri de tensiune, comparativ cu aparatura de control.

Această clasificare, pe două nivele, permite stabilirea unei priorități în studiul sensibilității unei instalații industriale față de golurile de tensiune. Pentru început trebuie rezolvate problemele puse de către sistemele de control. Apoi, dacă este necesar, trebuie determinați timpii maximi de întrerupere a tensiunii, acceptați de către mașini, după care trebuie găsit mijlocul de a le realimenta în acest interval și de a le reporni automat, imediat după dispariția perturbației.

În principiu este imposibilă suprimarea completă a golurilor de tensiune, indiferent de zona lor de origine (rețeaua furnizorului sau cea a unui utilizator). Pentru combaterea golurilor de tensiune se acționează:

- la nivelul rețelei, asupra cauzelor – diminuarea numărului lor;
- la nivelul utilizării, asupra efectelor – compensarea instantanee a pierderii de energie pe toată durata golului de tensiune.

Diminuarea frecvenței de apariție a golurilor de tensiune

Pentru aceasta se va acționa atât asupra rețelei furnizorului cât și a utilizatorilor. În cele ce urmează se prezintă câteva dintre procedeele folosite:

Modificarea structurii rețelei de alimentare, de exemplu prin racordarea consumatorului printr-o linie separată, pentru evitarea perturbațiilor ce provin de la alți utilizatori.

Modificarea rețelei interne a consumatorului cu scopul izolării părților sensibile la goluri de tensiune, pentru a evita influența asupra tensiunii a sarcinilor fluctuante (inclusiv a motoarelor cu porniri frecvente) sau a scurtcircuitelor cu probabilitate mare de apariție în alte părți ale instalației. De exemplu, se poate utiliza un cablu racordat direct la barele de JT ale transformatorului de alimentare, sau, în cazul unui utilizator racordat la MT, se poate realiza alimentarea părții sensibile la goluri de tensiune, printr-un transformator separat.

Compensarea instantanee a pierderilor de energie

Practic, soluția constă în utilizarea de dispozitive ce permit înmagazinarea de energie care va fi restituită în timpul fiecăruia dintre golurile de tensiune, cărora li se pot asocia sisteme ce permit bascularea foarte rapidă a sarcinii pe o altă sursă.

La ora actuală, acumularea de energie este realizată prin una dintre metodele prezentate mai jos. În Fig.2.2 sunt prezentate schematic diferitele soluții posibile iar în Tabelul 2.1 sunt precizate intervalele de timp în interiorul cărora sunt eficiente fiecare dintre aceste sisteme.

Soluția întâia: Utilizarea de volanți. Acești volanți, montați fie la motoarele existente, fie la grupurile motor-generator care alimentează instalația industrială sensibilă la goluri de tensiune, acționează practic ca surse de energie intercalate în circuitele de alimentare. Grupurile motor-generator la care este aplicabilă soluția pot avea puteri unitare cuprinse între câțiva kVA și câteva sute de kVA. Se poate astfel menține turația sau frecvența și tensiunea în limitele a câtorva procente în timpul unor intervale de timp având mărimi de ordinul $(0,5 \div 1)$ s, chiar și în cazul întreruperii complete a tensiunii de alimentare a sistemului.

Soluția a doua: Inserierea în circuitul de curent alternativ perturbat a unui ansamblu redresor-baterie tampon-invertor. Acest sistem prezintă o capacitate de acumulare a energiei mult mai mare decât cea a sistemului anterior. Duratele de autonomie pot ajunge la 30 minute, pentru puteri de la câțiva kVA la peste 1000 kVA (dacă se pun în paralel module de puteri de 100kVA sau 300kVA). Sistemul poate fi completat cu aparatură de comutație electromecanică sau electronică, capabilă să elimine rapid orice element defect fie dinspre sursă fie dinspre receptoare.

Soluția a treia: Utilizarea curentului continuu. Acesta este obținut cu ajutorul punților redresoare, care se asociază fie cu condensatoare pentru a se proteja împotriva eventualelor întreruperi de tensiune a căror durată maximă este de ordinul unei secunde și în timpul cărora cantitatea de energie ce trebuie furnizată este scăzută (câțiva W), fie cu baterii de acumulare pentru durate și cantități de energie mai importante (cum este de exemplu cazul circuitelor de temporizare a contactoarelor motoarelor).

Soluția a patra: dubla alimentare din rețea. Soluția este aplicabilă dacă instalațiile industriale suportă sau pot fi adaptate pentru a suporta, pe durata a câtorva zecimi de secundă, întreruperea tensiunii, perioadă necesară echipamentelor auxiliare pentru detectarea golului de tensiune și comutarea de pe o sursă pe alta.

Soluția a cincia: pornirea unui grup electrogen. Soluția este aplicabilă dacă instalațiile industriale suportă întreruperea tensiunii pentru o durată de câteva minute. Dacă generatorul este echipat cu un volant de inerție și cu ambreiaj și dacă motorul termic este preîncălzit, timpul de întrerupere poate fi mai mic de 0,5s.

Deși nu s-a ilustrat în Fig.2.2, aparatele insensibile la golurile de tensiune, pot fi eventual insensibilizate și față de întreruperile de tensiune de lungă durată, prin folosirea soluțiilor a patra sau a cincia.

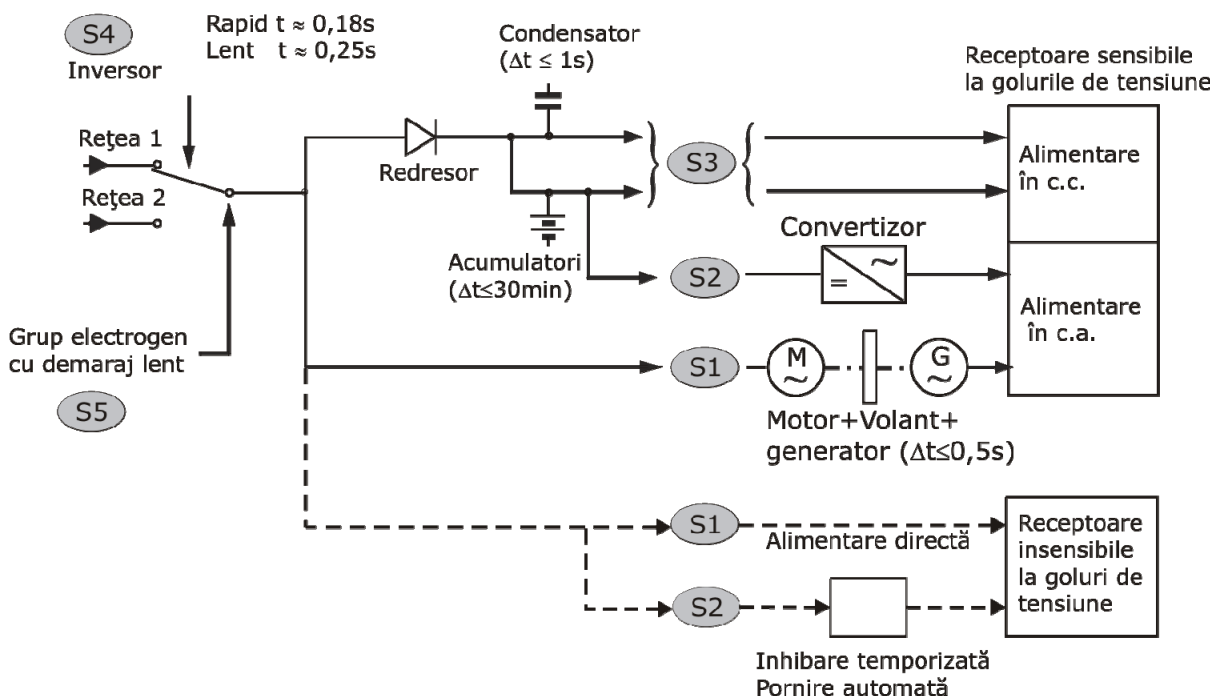


Fig.2.2. Diferite soluții de alimentare a receptoarelor sensibile sau nu la goluri de tensiune.

Primele trei soluții sunt utilizate de preferință pentru circuitele de comandă iar a patra și a cincia pentru circuitele de forță (dacă mașinile suportă golurile de tensiune sau chiar oprirea). Unele combinații de sisteme sunt mai economice decât altele: de exemplu combinația soluțiilor a treia și a patra față de întâia și a patra.

Trebuie adăugat aici un comentariu în legătură cu diferența de calitate a tensiunilor de alimentare furnizate de un generator, respectiv un convertor. Din punct de vedere al furnizării energiei, cele două sisteme pot fi considerate ca echivalente, dar nu la fel stau lucrurile din punct de vedere al calității unde de

tensiune. În cazul unui supracurent, care este sau nu consecința unui defect în sistemul ce trebuie protejat împotriva golurilor de tensiune, ia naștere un regim tranzitoriu în tensiune, a cărui durată este de ordinul a câtorva zeci de milisecunde în cazul grupului electrogen echipat cu protecții electromecanice clasice, respectiv de circa 20 ms în cazul unui convertor echipat cu protecții statice (ambele furnizând tensiuni cu frecvența de 50 Hz).

Tabel 2.1. Intervalele de timp ale eficacității diferitelor sisteme de compensare a golurilor de tensiune.

Tipuri și soluții		Intervale de timp							Observații
		0	0,1s	0,4s	0,5s	1s	4min	30min	
1	Mașini cu volant de inerție								Protecție totală între 0÷1 s
2	Redresor + baterie + inverter								Protecție totală între 0÷30 min
3	Contactoare temporizate prin condensator								Protecție între 0÷1 s dacă mașinile suportă întreruperi ≤ 1s
4	Comutarea între căile de alimentare								Fără protecție între 0÷25 s (în cazuri deosebite (0,18 s))
5	Grup electrogen								Fără protecție între 0÷4 min (timpul de demaraj)
	Grup electrogen cu pornire de la t = 0								Protecție totală de la t = 0 la mai multe ore (există însă o variație tranzitorie a turației în intervalul 0÷10 s)

2.5. Dinamica cercetărilor în probleme de goluri de tensiune

Diversificare consumatorilor de energie electrică și a echipamentelor de producere, transport și distribuție, au impus studii și cercetări tot mai ample în ceea ce privește calitatea energiei electrice, printre care se numără și studii privind cauzele și efectele golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție și transport, dar mai ales asupra comportării consumatorilor.

Au apărut diverse centre consacrate în studiul acestui fenomen, precum și de acumulare a unor concluzii obținute în diverse cercetări individuale sau colective de interes mai restrâns, astfel încât toate studiile realizate să concure la un real progres în eliminarea sau reducerea cauzelor care produc aceste perturbații, cât și a efectelor directe sau indirecte a golurilor de tensiune în ceea ce privește funcționarea echipamentelor electrice și a consumatorilor tot mai sensibili la aceste perturbații.

Studii cu un caracter mai general, care să arate cauzele și să stabilească anumite efecte asupra echipamentelor rețelelor și a unor consumatori, au apărut înaintea anilor '70, dar ele reprezintă doar o atenționare asupra fenomenelor și mai

puțin concluzii care să aibă efect de reducere sau eliminare. În anii '70 studiile asupra acestui fenomen au dobândit o importanță mai mare și s-au extins asupra efectelor induse de apariția golurilor de tensiune și întreruperilor accidentale, apărând unele concluzii parțiale, metode de studiu a fenomenului și propuneri de soluții pentru diminuarea efectelor și eliminarea unor cauze care însoțesc acest fenomen.

Începând cu anii '80 asociația IEEE și-a intensificat acțiunile de colectare și difuzare a studiilor specifice în domeniul calității energiei electrice, apărând astfel tot mai multe studii referitoare la goluri de tensiune și efectele acestora. Aceste studii au devenit tot mai numeroase, până în acest moment dovedindu-se interesul deosebit acordat acestui fenomen, atât asupra cauzelor cât și a defectelor produse. Dinamica acestor studii și cercetări publicate începând cu anii '50 și până în prezent sunt prezentate în Fig.2.3. Precizez că analiza se realizează pe baza de date IEEE, condiția de selectare impusă a fost găsirea tuturor articolelor care au în *titlu* unul din următorii termeni: „voltage sag” sau „voltage dip”.

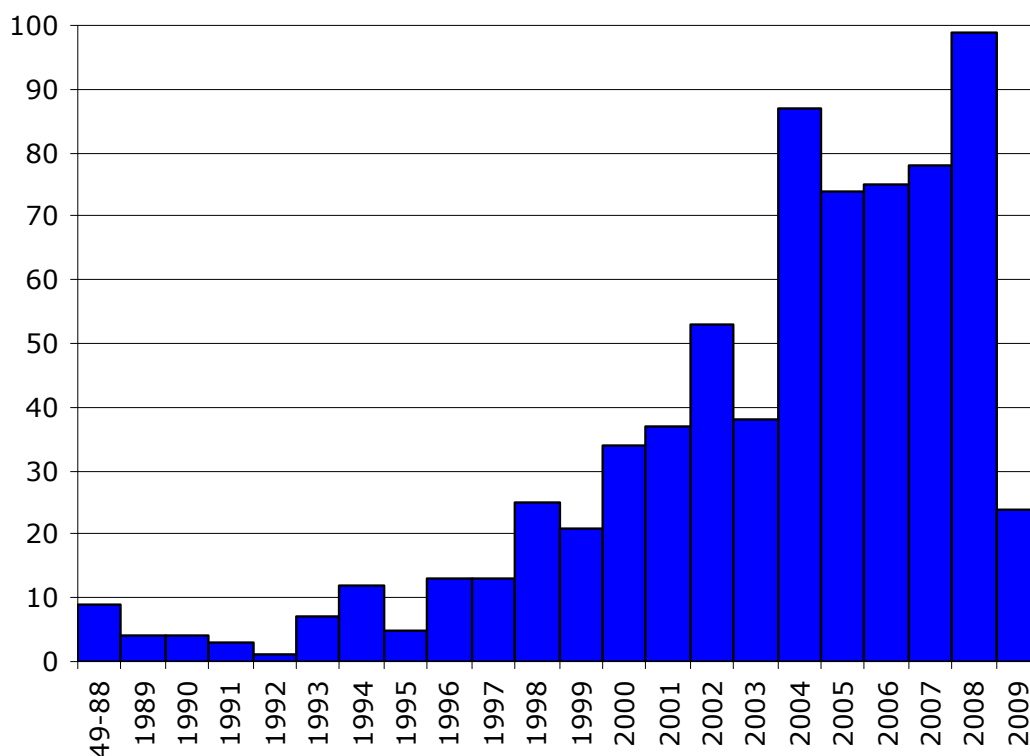


Fig.2.3. Dinamica studiilor, privind golurile de tensiune, publicate în baza de date IEEE.

Pe lângă alte publicații de profil care s-au dedicat informării și monitorizării studiilor pe acest fenomen, organizația IEEE a publicat în perioada 1949-2009 peste 700 de studii efectuate în întreaga lume pentru a prezenta diverse concluzii asupra cauzelor și efectelor acestui fenomen, unele având caracter mai general, iar altele concentrate pe anumite situații cum ar fi studii de interes local sau individual.

Aceste studii pot fi împărțite cel puțin în patru categorii:

- Studii asupra problemelor generale legate de golurile de tensiune;
- Studii referitoare la influențele economice ale golurilor de tensiune asupra rețelelor și asupra consumatorilor;
- Studii referitoare la metodele de compensare sau diminuare a apariției;

- Studii asupra metodelor de combatere și soluțiilor de diminuare a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor.

2.5.1. Studii asupra problemelor generale legate de golurile de tensiune

Din peste 700 de studii publicate de IEEE, 26% reprezintă studii dedicate cauzelor, efectelor, metode de monitorizare și analiza a acestui fenomen sau care propun anumite metode de studiu a acestui fenomen, respectiv definiții și standarde pentru monitorizare și analiză (atât teoretice, cât și practice).

Și în acest sens studiile au devenit din ce în ce mai frecvente și mai elaborate, propunând noi metode de abordare în studiul acestui fenomen. O dinamică a acestor studii este prezentată în Fig.2.4.

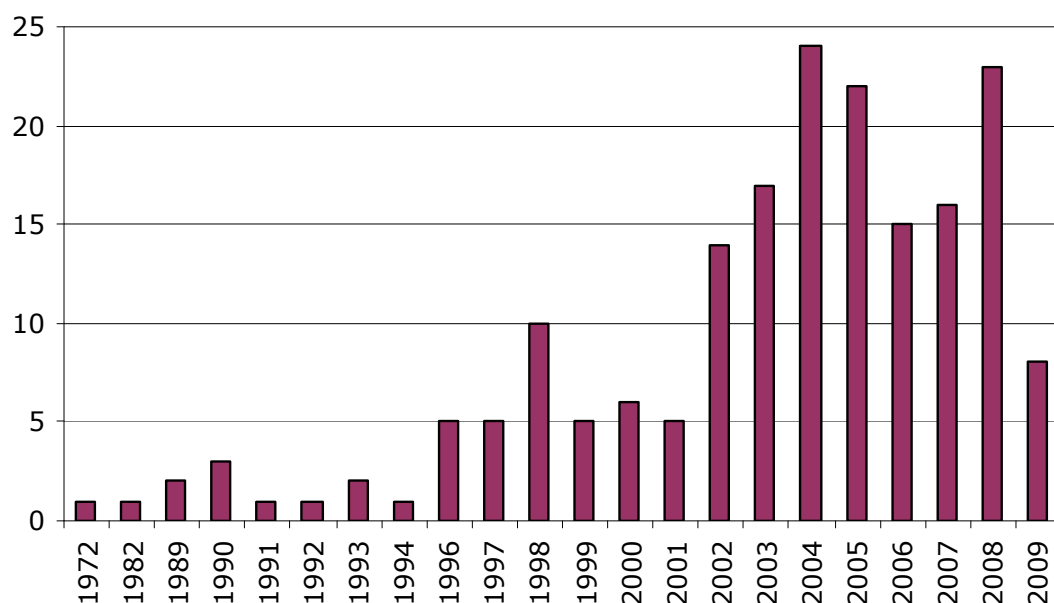


Fig.2.4. Dinamica studiilor, privind problemele generale ale golurile de tensiune, publicate în baza de date IEEE.

Analizând studiile realizate în ultimii ani, constatăm creșterea interesului în cercetarea cu caracter general a fenomenului golurilor de tensiune, care a condus la soluții tot mai practice și mai elaborate în acest sens.

În 2000, Zhang a inițiat un studiu cu caracter teoretic care analizează caracteristicile golurilor de tensiune în sisteme electrice, punând accent pe goluri de tensiune nesimetrice analizate cu metoda componentelor simetrice [Zhang2000]. S-a construit un model generalizat de gol de tensiune pentru golurile simetrice, ținând cont de tipurile defectelor, tipurile transformatoarelor și conectarea sarcinilor. În urma analizei realizată cu această metodă s-a ajuns la următoarele concluzii:

- componentele simetrice dau o înțelegere mai bună a caracteristicilor golurilor nesimetrice;
- modelul generalizat bazat pe componente simetrice poate aduce clarificări asupra diferitelor clasificări de goluri de tensiune nesimetrice.

Admițând că impedanțele de secvență pozitivă și negativă sunt egale se pot caracteriza golurile de tensiune cu un fazor numit tensiunea complexă remanentă, care corespunde definiției general acceptate a amplitudinii golurilor simetrice. Pentru a demonstra valabilitatea ideii de bază s-a introdus un al doilea fazor, numit factor de nesimetrie (PN), a cărui deviație față de unitate se datorează diferenței dintre impedanțele de secvență pozitivă și de secvență negativă. Astfel se constituie o metodă de analiză a înțelegerii caracteristicilor golurilor de tensiune simetrice și nesimetrice din punctul de vedere al sistemului.

În 2003 Bollen, propune două algoritme de caracterizare a golurilor de tensiune pornind de la clasificarea prin metoda componentelor simetrice. Primul algoritm este denumit „Algoritmul componentelor simetrice” și se bazează pe raporturi create între amplitudinile componentelor de secvență directă și inversă. Al doilea algoritm se numește „Algoritmul celor șase faze” și are ca principiu determinarea valorilor efective a tensiunilor de fază și de linie. Pe baza acestor tensiuni se determină tipul golului de tensiune rezultat [Bollen2003a].

Tot Bollen, prezintă schimbările de formă și amplitudine a golurilor de tensiune în timpul propagării lor de la nivelul de tensiune al defectului până la nivelul de tensiune la care sunt conectate bornele echipamentelor. Autorii analizează propagarea golurilor de tensiune simetrice și nesimetrice la bornele unui motor asincron, precizând ușurința de aplicare a metodei componentelor simetrice [Bollen2003b].

Dong-Jun Won (2005) propune o nouă metodă de caracterizarea a golurilor de tensiune pornind de la ideea că metodele convenționale nu pot caracteriza corect golurile de tensiune, care nu respectă forma dreptunghiulară a valorii efective a tensiunii. El propune deducere unor coeficienți de corecție determinați pe baza analizei armonice a curbei tensiunii [Won2005].

În 2005, Ignatova propune o metodă de determinare a tipului golului de tensiune, conform clasificării ABC, pornind de la reprezentarea vectorială în spațiu. Metoda propusă de autor este foarte ușor de implementat, și pe lângă tipul golului de tensiune se obține și informațiile privind amplitudinea și modificarea defazajului dintre tensiuni [Ignatova2005].

Astfel se constituie o metodă de analiză a înțelegerii caracteristicilor golurilor de tensiune simetrice și nesimetrice din punctul de vedere al sistemului.

În anul 2004, Florio a creat un algoritm de detecție a golurilor de tensiune bazat pe analiza tensiunii redresate. Algoritmul dorește să detecteze golurile de tensiune într-un timp cât mai scurt, până la un sfert de perioadă, apoi să deconecteze linia cauzatoare de goluri și să conecteze o sursă auxiliară. Acest algoritm ocupă foarte puțină memorie și poate fi implementat pe platforme cu cost redus. În concluzie algoritmul prezintă avantajul unei detecții foarte rapide (sub 1 ms la aproape toate testele) cu o alocare de memorie redusă și un număr de instrucțiuni mic [Florio2004].

În anul 2005, Wang descrie o metodă analitică performantă de anticipare a apariției golurilor de tensiune în rețelele de distribuție a energiei. Indicele de severitate a golurilor de tensiune, ca rezultat al defectelor din sistem, este calculat utilizând durata și amplitudinea lor. Se ține cont de sensibilitatea fiecărui tip de consumator și se folosesc algoritmi diferiți de evaluare. Se arată că odată ce există suficiente informații, se poate estima foarte bine numărul și severitatea golurilor de tensiune. Această estimare este foarte utilă pentru predicția impactului acestor goluri asupra funcționării diferiților consumatori sensibili și de asemenea, pentru planificarea soluțiilor de reducere a efectelor golurilor, de îmbunătățire a calității precum și de susținere a funcționării rețelei. În concluzie acest studiu este foarte util

pentru a fi implementat în alte sisteme de analiză a fenomenului pe componente cu caracter mai individual atât în rețelele de transport și distribuție cât și la consumatori. Algoritmii pot fi ușor adaptați și folosiți în alte studii și cercetări ce urmează a fi realizate în viitor, deci este o idee de bază în studiile acestui efect [Wang2005].

Există numeroase studii cu un pregnant caracter teoretic și general care merită menționate și care au o contribuție semnificativă în clarificarea problemelor acestui fenomen și în stabilirea unor metode de analiză teoretică și de caz, pentru a realiza progrese în eliminarea sau reducerea efectelor golurilor de tensiune, atât asupra instalațiilor de producere, transport și distribuție, cât și asupra consumatorilor în funcție de sensibilitățile manifestate în raport cu acest fenomen.

Conrad (1989), este unul dintre pionierii tehnicilor de estimare a golurilor de tensiune. El oferă tehnici generale de estimare, prevenire și reducere a golurilor de tensiune datorate proceselor de eliminare a scurtcircuitelor. El arată cum să trebuie combinate programele de analiză acceptate pentru a estima toate caracteristicile importante ale golurilor de tensiune [Conrad1989].

Fouad (1990) în [Fouad1990], arată că metoda funcției energiei tranzitorie (TEF) este o abordare de aproximare rapidă în calculul golurilor de tensiune. Metoda este folosită pentru a estima stabilitatea sistemelor energetice după apariția unei perturbații. Rezultatele aplicării acestei tehnici de testare a sistemelor electrice confirmă că golurile de tensiune estimate cu această metodă sunt apropiate cu cele determinate prin metodele clasice.

Lamoree (1993) în [Lamoree1993] prezintă rezultatele de la un număr diferit de investigații, care includ caracterizarea performanțelor la goluri de tensiune a echipamentelor sensibile. S-au făcut teste la diferite amplitudini și durate ale golurilor de tensiune. Sunt descrise și posibile soluții la problemele legate de sensibilitatea la goluri de tensiune.

Kai Yao (1998) studiază o abordare fazorială pentru a determina propagarea golurilor de tensiune prin diferite tipuri de transformatoare [Kai1998]. El pornește de la un gol de tensiune generat de un scurtcircuit monofazat și studiază propagarea acestuia pentru nouă cazuri de conexiuni a transformatoarelor.

Tot în 1998 Qader, prezintă două metode de estimare probabilistică pentru goluri de tensiune și aplicațiile acestor metode la un model de 97 noduri din rețeaua națională de 400 kV a Angliei și Țării Galilor. S-a demonstrat că metoda de localizare a defectului este foarte potrivită pentru implementarea într-o aplicație software de determinare a propagării golurilor de tensiune în sistem [Qader1999].

Ala (1999) în [Ala1999] analizează comportamentul tranzitoriu datorat golurilor de tensiune care apar în rețele de distribuție de medie tensiune, ca și consecință a scurtcircuitelor. Autorii prezintă și modul cum este afectată amplitudinea golului de tensiune de structura rețelei.

Leborgne (2003) a investigat o metodă alternativă pentru caracterizarea sensibilității procesului industrial la golurile de tensiune utilizând sisteme de monitorizare a calității energiei. Au fost analizate câteva metode utilizate pentru caracterizarea golurilor de tensiune. Comportamentul sarcinii a fost clasificat pentru toate golurile înregistrate. În urma studiului, a rezultat ca și soluție mai eficientă, o metodă bazată pe amplitudinea golului, pentru caracterizarea sensibilității consumatorului. S-a ajuns la concluzia că sarcinile au fost sensibile la amplitudini ale golurilor mai joase de 0.7 u.r.n. [Leborgne2003].

2.5.2. Studii privind influențele economice ale golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție și asupra consumatorilor

Problema influențelor economice a golurilor de tensiune este foarte importantă deoarece afectează atât consumatori dacă sunt produse în rețelele de transport sau distribuție, cât și rețelele de transport și distribuție dacă golurile de tensiune sunt produse de către consumatori.

Din mulțimea studiilor realizate și publicate în IEEE 14% au ca temă influența golurilor de tensiune, iar distribuția acestor studii de-a lungul ultimilor 60 de ani este prezentată în Fig.2.5.

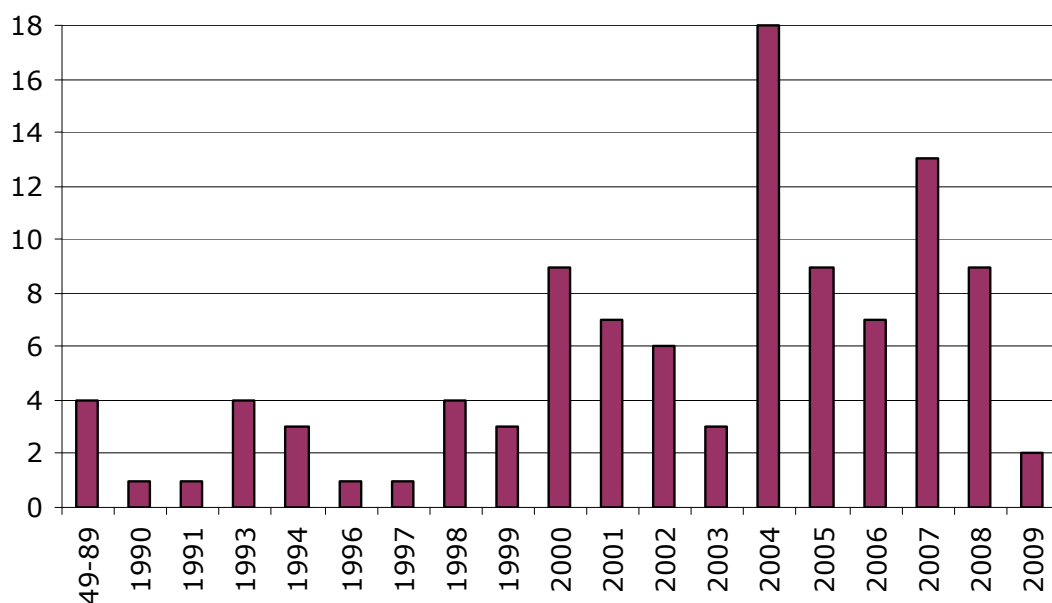


Fig.2.5. Dinamica studiilor, privind influențele economice ale golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție și asupra consumatorilor, publicate în baza de date IEEE.

În continuare se prezintă câteva studii efectuate asupra influențelor economice ale golurilor de tensiune în ultimii ani, iar cele mai importante concluzii ale acestora reprezintă o relevanță în scopul urmărit în prezenta lucrare cu precizarea că, dinamica acestor cercetări arată importanța ce se acordă acestui fenomen și a influențelor pe care le implică inclusiv sub aspect economic.

Heine în 2002, a dezvoltat o metodă de estimare a frecvenței și a costului golurilor de tensiune. Numărul anual al golurilor de tensiune și costul acestora au fost determinate pentru cinci companii de distribuție. A fost aplicată metoda localizării defectelor pentru calcularea frecvenței golurilor de tensiune. Consecințele economice au fost evaluate prin înmulțirea frecvenței golurilor și costul acestora, cu numărul de clienți afectați. Costul unui singur gol de tensiune a fost determinat de un sondaj care a fost efectuat în trei țări nordice la jumătatea anilor '90. În plus, el estimează costul anual legat de goluri de tensiune pentru fiecare dintre societățile luate în considerare în acest studiu și pentru fiecare categorie de client. În cele din urmă, autorii au ajuns la concluzia că, costul total pe client pare să fie mult mai mare decât a fost în general asumat [Heine2002].

Degeneff (2000) a declarat că "costul" calității scăzute a energiei depinde de mai mulți factori, dar în special de golurile de tensiune și în general variază de la

50 la 400 USD/kVA pentru un echipament, pe durata unui an. Autorii au analizat numeroase metode de reducere a golurilor de tensiune cum ar fi: surse de curent neîntreruptibile, transformatoare cu ferorezonanță, comutatoare statice de transfer, transformatoare cu comutatoare electronice ale prizei de reglaj și compensatoare statice de tensiune. În cele din urmă, autorii au prezentat o comparație a costurilor totale pentru diferite opțiuni de alegere a metodei de reducere a golului de tensiune. Costul total al unei soluții este obținut combinând costul de investiție cu echipamentul, cu costul operării acestuia și adăugând costul datorat limitării dispozitivului [Degeneff2000].

Gupta în [Gupta2004], a studiat influența perturbațiilor din rețelele electrice asupra consecințelor economice pentru diferite tipuri de consumatori. Golurile de tensiune sunt cele mai comune perturbații care cauzează întreruperea funcționării unor echipamente ale consumatorului. Lucrarea se axează pe efectele produse de golurile de tensiune și face o evaluare economică din punct de vedere al calității energiei electrice. Prin combinarea evaluării probabilistice a golurilor de tensiune cu curbele de acceptabilitate a tensiunii pentru echipamente electrice, poate fi făcută o estimare a evenimentelor de goluri de tensiune responsabile pentru întreruperea funcționării echipamentelor consumatorilor, pentru o anumită perioadă de timp. Dacă se determină costurile întreruperilor pentru fiecare eveniment, se poate face o evaluare a pierderilor financiare ale consumatorilor datorită acestor perturbații, pentru perioada de timp monitorizată (calculabilă la nivel de un an sau mai mult). Această abordare poate fi folosită ca un instrument de selecție a celei mai favorabile locații de racordare la rețea pentru consumatorii ce folosesc echipamente sensibile.

Stockman (2005) prezintă costul efectiv al soluțiilor de creștere a imunității dispozitivelor de acționare în curent alternativ, împotriva golurilor de tensiune. Soluțiile sunt bazate pe clasificarea golurilor de tensiune în trei tipuri și pe o analiză experimentală a mecanismelor de protecție aplicate în dispozitivele de acționare comerciale. Metoda propusă pentru reducerea sensibilității dispozitivelor de acționare în curent alternativ, la goluri de tensiune s-a validat prin verificare experimentală [Stockman2005].

2.5.3. Studii referitoare la metode de compensare și diminuare a efectelor golurilor de tensiune

Diminuarea numărului de goluri de tensiune produse și diminuarea efectelor acestor, respectiv compensarea parțială sau totală a efectelor, a reprezentat o preocupare constantă de-a lungul anilor și foarte multe personalități și centre de cercetare au abordat această temă, fie în aspecte generale (teoretice), cu verificări pe aplicații concrete, fie cu aspect aplicativ urmărind determinarea unor metode sau a unor echipamente specifice, care să anihileze sau să compenseze efectele golurilor de tensiune asupra rețelelor de distribuție în general, dar și asupra consumatorilor sensibili în raport cu acest fenomen.

Studiile efectuate și publicate în IEEE arată că 34% dintre ele au tema de studiu și cercetare, determinarea condițiilor, metodelor și tehnicilor care ar putea contribui la compensarea sau diminuarea efectelor golurilor de tensiune, indiferent de sensul în care se transmite efectul. Dinamica cercetărilor și studiilor publicate în IEEE este prezentată în graficul din Fig.2.6.

Studiile referitoare la metodele de compensare și diminuare a efectelor golurilor de tensiune au cunoscut o efervescentă deosebită în ultimii ani incitând o

mare parte a persoanelor și instituțiilor de profil în a stabili noi metode, practici și echipamente tot mai diverse și performante având ca scop această temă.

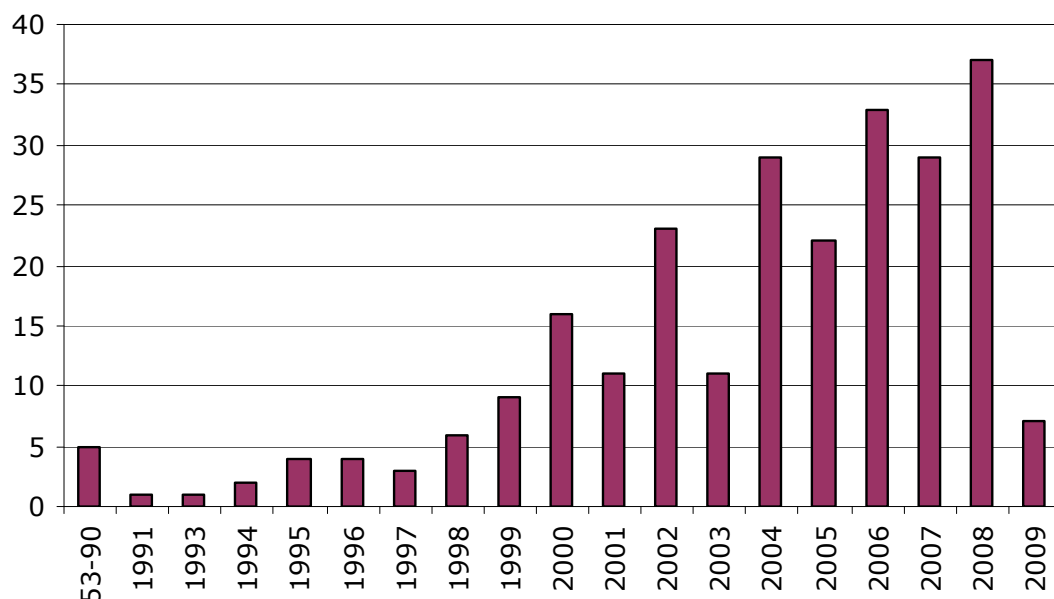


Fig.2.6. Dinamica studiilor, referitoare la metode de compensare și diminuare a efectelor golurilor de tensiune, publicate în baza de date IEEE.

Gomez (2000) a propus diminuarea golurilor de tensiune folosind siguranțe fuzibile de limitare a curentului. Autorii au analizat coordonarea curbelor sensibilității echipamentului la golurile de tensiune și energia specifică a siguranțelor fuzibile de limitare a curentului. Există mai multe tipuri de siguranțe fuzibile, care permit realizarea celei mai bune selecții pentru reducerea duratei golurilor de tensiune, folosind caracteristica de control a energiei siguranței [Gomez2000].

Sannino (2000) a propus reducerea golurilor de tensiune utilizând un convertor conectat în serie, ca și sursă de tensiune. La baza acestuia stă un algoritm bazat pe descompunerea tensiunilor nesimetrice în componente de secvență pozitivă și negativă. Mai mult decât atât, performanța acestuia a fost îmbunătățită prin implementarea unui algoritm pentru compensarea căderii tensiunii la bornele convertorului în regim staționar [Sannino2000].

Surapong în [Surapong2000], analizează posibilitatea reducerii impactului golurilor de tensiune provocate de cuptoarele cu arc electric. Acest studiu examinează și caută metode de îmbunătățire a performanțelor operării cuptoarelor cu arc electric și minimalizarea efectelor armonicilor și golurilor de tensiune produse de aceste operări. S-a elaborat un model dinamic de cuptor cu arc, încorporând atât caracteristici electrice, cât și cele termice. Modelul poate fi folosit pentru identificarea unor zone posibile pentru îmbunătățirea cuptoarelor și a modului de operare a lor. În acest scop au fost înregistrate, în punctul de cuplare comună la rețea, captări ale formei undelor de curent și tensiune, precum și alte mărimi electrice cum ar fi: valorile efective ale tensiunii și intensității curentului, precum și puterile absorbite de cuptor. Au fost folosite programe de simulare a armonicilor și de simulare a regimului tranzitoriu electromagnetic, pentru a modela efectele armonicilor și ale golurilor de tensiune, încercând identificarea filtrelor dinamice și statice corespunzătoare pentru reducerea și compensarea efectelor conexe. Efectele armonicilor și golurilor de tensiune au fost identificate la bornele unui consumator

conectat în aceeași stație electrică, deci în punctul comun de cuplare la rețeaua de alimentare. Studiile simulării au fost făcute pentru a examina rezultatele obținute la al doilea consumator, în cazul în care se folosesc aceleași filtre ca cele utilizate la cuptoarele cu arc. Metodologia folosită și strategiile identificate pentru micșorarea efectelor sunt aplicabile și în situații generale în sisteme de distribuție a energiei, unde funcționează echipamente care provoacă perturbații mari în funcționare.

Ran studiază în 2001, pe o analiză statistică, implementarea unei scheme de control pentru un compensator trifazic serie de calitate a energiei electrice, denumit în lucrare SPQC (Series Power Quality Compensator), pentru reducerea golurilor de tensiune, supratensiunilor, armonicilor și eliminarea nesimetriilor. Acest compensator propus, constă din înserierea în circuit a unui invertor de tensiune realizat cu transistoare de tip IGBT, cu rol de filtru activ serie, și utilizarea în derivație a unui redresor trifazat pentru alimentarea unui condensator. Sunt prezentate simulările și rezultatele experimentale pentru a ilustra eficiența folosirii SPQC-ului în reducerea efectelor perturbațiilor prezente în sistemele de distribuție [Ran2001].

Escobar (2002) în [Escobar2002], prezintă o metodă de comandă a unui filtru activ serie care să asigure o tensiune sinusoidală simetrică la bornele consumatorului, în pofida prezenței perturbațiilor în tensiune sursei de alimentare (tensiuni nesimetrice, armonici, goluri de tensiuni și supratensiuni). Pentru a realiza acest obiectiv, filtru activ serie injectează tensiune adecvată în linia de conexiune printr-un transformator conectat în serie. Acest lucru este făcut în trei stagii de către circuitul de comandă propus, un stagiu de control exterior care forțează tensiunea injectată să urmărească o referință periodică, al doilea reglementează nivelul de tensiune în curent continuu pe condensator, iar al treilea permite condensatorului să elibereze sau să absoarbă energia necesară pentru a îmbunătăți transferul la nivelul de tensiune a consumatorului când apar schimbări în energia activă generată de sursă sau absorbită de consumator.

Di Perna (2003) în [DiPerna2003], prezintă un compensator static serie pentru efectuarea compensării golurilor de tensiune injectând o componentă de secvență zero, strategie bazată pe acțiunea de răspuns a compensatorului serie, independent de parametrii și de variațiile sistemului. Rezultatele simulării demonstrează performanța acestuia în reducerea golurilor de tensiune. Simulările sunt folosite pentru a defini caracteristicile unui prototip.

Tian (2004) în [Tian2004], pornește de la experiența industrială care arată că invertoarele cu tiristoare conectate la linii trifazate au probleme de comutație datorate golurilor de tensiune. S-a pornit de la analiza unui gol de tensiune monofazat și se propune o schemă care să detecteze scurtcircuitul și să blocheze tiristoarele afectate pentru a evita distrugerea acestora. La revenirea tensiunii, invertorul revine la operarea normală. Schema propusă are un răspuns rapid și nu necesită o sursă de tensiune separată pentru controlul circuitului. În plus s-au prezentat și verificările experimentale ale mecanismului de închidere a tiristorului.

Viawan (2005) realizează o cercetare asupra impactului generării distribuite, asupra coordonării protecțiilor la scurtcircuit în rețele trifazate de medie tensiune și asupra golurilor de tensiune resimțite de consumatori monofazați din rețeaua de joasă tensiune, arătând modul de adaptare a protecțiilor, pentru a se obține o influență cât mai mică a golurile de tensiune asupra echipamentelor sensibile la acest fenomen [Viawan2005].

Immanuel (2006) prezintă o tehnică de reducere a golurilor de tensiune cu ajutorul unui redresor de tensiune dinamic, realizat cu trei nivele de diode, care are

ca rezultat o compensare omogenă a golurilor de tensiune și care introduce o poluare armonică neglijabilă [Immanuel2006].

Zenglu (2008) în [Zenglu2008] propune o metodă de compensare serie a golurilor de tensiune, care nu utilizează transformator de injecție și nici condensator de stocare a energiei ca și în cazul metodelor clasice. Această metodă are avantajul unui cost foarte scăzut, dar poate realiza o compensare pentru golurile de tensiune simetrice trifazate doar dacă tensiunea nu scade sub 37% din cea nominală.

2.5.4. Studii privitoare la influența și combaterea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor

Diversificarea gamei consumatorilor, atât ca performanță, cât și ca utilitate a lor, a avut ca efect sporirea sensibilității acestora în raport cu calitatea energiei electrice. Acest aspect a determinat o analiza complexă și întreprinderea unor cercetări vaste, pentru a se găsi mijloacele și metodele de combatere a efectelor golurilor de tensiune apărute în rețeaua de alimentare asupra consumatorilor, cât și a efectelor transmise în rețea de golurile de tensiune provocate de consumatori.

Urmărind lucrările publicate în IEEE constatăm că 24% dintre ele sunt efectuate cu referire la consumatori, atât ca efecte asupra lor, cât și ca efecte induse de consumator asupra echipamentelor din rețelele de distribuție a energiei electrice. Numărul studiilor și cercetărilor efectuate conform IEEE au crescut în ultimii ani, iar dinamica acestora este prezentată în Fig.2.7.

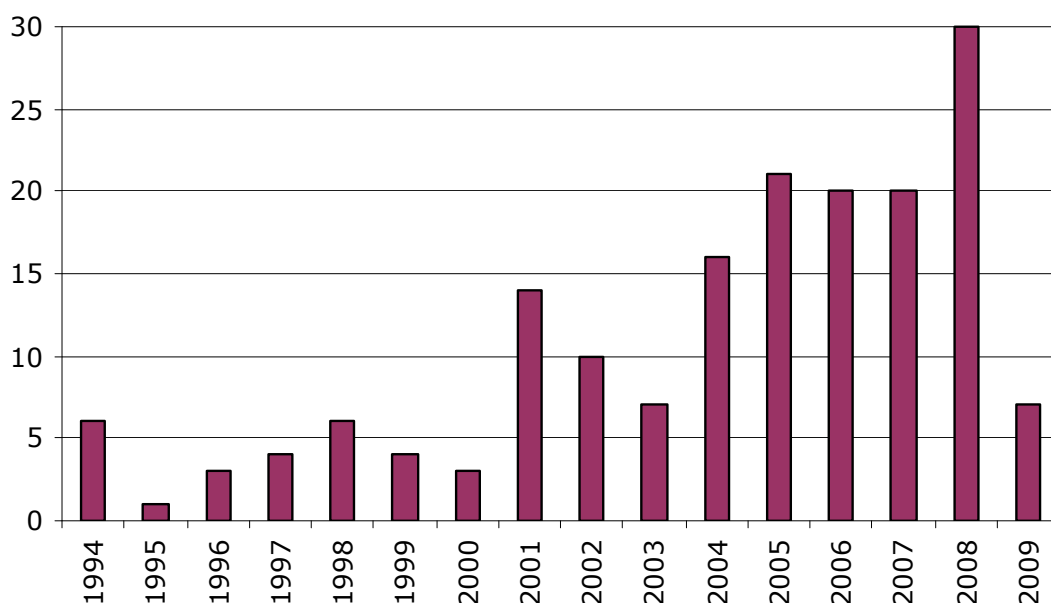


Fig.2.7. Dinamica studiilor, privitoare la influența și combaterea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor, publicate în baza de date IEEE.

Cele mai semnificative studii referitoare la efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor cu sensibilitate sporită și a efectelor provocate de unii consumatori asupra rețelelor de distribuție, care au fost publicate în IEEE și alte publicații de profil, vor fi prezentate în continuare spre exemplificare, în scopul sensului prezentei lucrări.

Das (1990) în [Das1990], studiază efectul golurilor de tensiune asupra motoarelor cu inducție și sincrone, sub aspectul stabilității în funcționare la sarcini constante și variabile, dar și influența pornirii motoarelor cu inducție și sincrone de puteri mari, asupra rețelei de alimentare. El propune și măsurile necesare pentru a diminua efectele în ambele sensuri, pentru obținerea unei eficiențe mai mari.

Sannino (2001) studiază aplicațiile unui dispozitiv static conectat în serie pentru reducerea golurilor de tensiune la bornele unui motor cu inducție. Scopul acestui studiu este acela de a verifica obținerea unor performanțe satisfăcătoare la goluri de tensiune în prezența sarcinilor dinamice. Sunt prezentate rezultatele obținute prin folosirea tehnicilor de înregistrare actuale ale golurilor de tensiune și efectele produse asupra funcționării motoarelor cu inducție [Sannino2001].

Kyei (2002) realizează un studiu cu referire la curbele se acceptabilitate definite în standardele existente. El menționează că standardele actuale pornesc de la considerarea evenimentului monofazat. Cercetarea decurge în sensul analizei pe baza golurilor de tensiune trifazate simetrice sau nesimetrice. În studiul se analizează și efectul consumatorilor cu componentă rotativă în modul de definire a curbilor de acceptabilitate [Kyei2002].

Silva (2002) în [Silva2002], prezintă topologii noi de compensatoare de goluri de tensiune de mica putere, bazate pe eliminarea transformatorului serie și utilizarea structurilor cu un număr mic de întrerupătoare semiconductoare, utilizabile pentru mici consumatori ce prezintă sensibilitate mare la golurile de tensiune. Sunt descrise principalele aspecte ale specificațiilor componentelor, un exemplu de design, un studiu de simulări care include evaluarea funcționării condensatorului propus pentru încărcări neliniare.

Gomez (2002) a făcut un studiu privind influența golurilor de tensiune asupra comportării motoarelor asincrone. În urma studiului s-a demonstrat că în cazul golurilor de tensiune de amplitudine scăzută, apare un stres termic în înfășurările motorului. Acest stres apare datorită creșterii curenților la reaccelerarea motorului după eliminarea golului de tensiune. Totuși acest fenomen poate fi înlăturat prin reglarea corectă a dispozitivelor de protecție. Autorii afirmă că la nivelul unui consumator industrial, trebuie realizată o schemă de repornire a procesului tehnologică [Gomez2002].

Guasch (2004) a realizat un studiu privind influența golurilor de tensiune trifazate asupra comportării motoarelor asincrone. Studiul a fost realizat pentru 5000 de cazuri diferite, iar scopul său a fost de a determina cele mai rele situații care afectează motoarele din punct de vedere al curenților pe faze și din punct de vedere al cuplului mecanic. Autorii au prezentat grafic rezultatele din care reiese că valoarea maximă a curenților prin motor depinde foarte mult de durata golului de tensiune și de momentul în care acesta apare. Totodată aceștia au realizat o clasificare după mai multe metode a efectelor golurilor de tensiune trifazate asupra motoarelor asincrone [Guasch2004].

În 2008 Milanovic a realizat două studii cu privire la influența motoarelor asincrone asupra propagării golurilor de tensiune. Autorii au arătat că în momentul apariției golului de tensiune, un grup de motoare electrice vin în ajutorul stabilității tensiunii, dar la revenirea tensiunii pot prelungii durata golului de tensiune datorită efectului de reaccelerare a motoarelor. Ei au arătat că în curba tensiunii, pe durata golului de tensiune, apare o dependență de diferiți parametrii, dintre care amintesc parametrii electrici și mecanici ai motoarelor, numărul de motoare existente, severitatea golului de tensiune și numărul de faze afectate [Milanovic2008a]. În cea de-a doua lucrare autorii prezintă o metodă de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor sensibili. Se pornește de la un gol de tensiune

dreptunghiular care este deformat de caracteristicile mașinilor electrice. Apoi se calculează un gol de tensiune echivalent de formă dreptunghiulară, care rezultă din golul de tensiune deformat de către efectul motoarelor de inducție. Noul gol de tensiune obținut, diferă față de cel original datorită creșterii duratei de restabilire a tensiunii [Milanovic2008b].

2.6. Concluzii și contribuții

În cadrul acestui capitol au fost prezentate și analizate o serie de noțiuni fundamentale legate de tematica tezei: probleme generale privind calitatea energiei electrice, încadrarea temei de cercetare în domeniul calității energiei electrice, descrierea fenomenului denumit gol de tensiune, cauzele golurilor de tensiune, efectele acestora asupra consumatorilor, metode actuale de protejare a consumatorilor împotriva efectelor golurilor de tensiune, istoricul privind studiul golurilor de tensiune, stadiul actual privind studiile golurilor de tensiune.

În mod deosebit, în acest capitol, s-a analizat problematica golurilor de tensiune, printr-un vast studiu bibliografic. După cum se observă acest studiu a fost împărțit pe probleme de cercetare, punându-se accentul pe modurile de caracterizare și clasificare a golurilor de tensiune. O altă problemă mai intens analizată a fost aceea de urmărire a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor dinamici, precum și influența consumatorilor dinamici asupra formei și parametrilor golurilor de tensiune.

Concluziile studiului bibliografic sunt:

- golurile de tensiune sunt unele dintre cele mai importante probleme privind calitatea energiei electrice;
- ele sunt în general, generate de apariția curenților de scurtcircuit din sistem;
- monitorizarea lor a devenit o problemă din ce în ce mai discutată în cercurile ingineresti din întreaga lume;
- caracterizarea lor reprezintă o problemă delicată, îndelung analizată, pentru care nu există o metodă general acceptată;
- influența golurilor de tensiune asupra consumatorilor dinamici este o problemă analizată în general pe cazuri particulare (efectul asupra unui motor sincron sau asincron), și mai puțin pe cazuri generale cum ar fi efectul golurilor de tensiune asupra unei zone care are un consum preponderent compus din consumatori rotativi; există și o influență inversă.

În continuare se prezintă o sinteză privind contribuțiile personale din cadrul acestui capitol:

- prezentarea într-o manieră personală a principalelor noțiuni privind definirea și standardizarea calității energiei electrice;
- sinteza noțiunilor generale privind golurile de tensiune, realizată printr-un studiu bibliografic intens și de dimensiuni mari;
- analiza critică pe baza de date IEEE, privind studiul golurilor de tensiune din punct de vedere a problemelor generale, dar mai ales extragere și analiza mai detaliată a principalelor articole legate de tematica acestei teze.

3. ANALIZA CALITĂȚII TENSIUNII

Acest capitol conține o metodă de analiză a calității tensiunii care are ca și scop prezentarea stadiului actual de analiză a calității tensiunii electrice precum și încadrarea golurilor de tensiune în acest domeniu. La începutul capitolului se prezintă câteva posibilități de clasificare a perturbațiilor electromagnetice care afectează calitatea tensiunii, după care se definesc nivelele de acceptabilitate pentru diferitele perturbații. În continuare se prezintă principalii indicatori ce caracterizează fiecare perturbație care afectează calitatea energiei electrice, dintre care se poate remarca inclusiv indicatorii golurilor de tensiune. Capitolul se încheie cu un studiu de caz realizat în cadrul unui contract de cercetare cu S.C. Electrica Banat.

3.1. Probleme generale privind calitatea tensiunii

3.1.1. Perturbații electromagnetice. Definiții și clasificări

Perturbațiile electromagnetice se definesc ca fiind fenomene electromagnetice care pot degrada performanțele unui dispozitiv, echipament sau sistem, sau să afecteze defavorabil materia vie sau inertă. O perturbație electromagnetică poate fi un zgomot electromagnetic, un semnal nedorit sau o modificare a mediului de propagare. Perturbațiile care pot afecta mediul electromagnetic sunt următoarele [IEC61000-2-8]:

- Perturbații de joasă frecvență:
 - conduse (prin conductoarele rețelei):
 - armonici;
 - interarmonici;
 - variația frecvenței tensiunii de alimentare;
 - fluctuații de tensiune (flicker);
 - goluri și întreruperi de tensiune;
 - variații ale tensiunii de alimentare;
 - prezența componentei continue în curba tensiunii de alimentare;
 - tensiuni induse de joasă frecvență;
 - radiate (de către conductoarele rețelei):
 - câmp magnetic;
 - câmp electric.
- Perturbații de înaltă frecvență:
 - conduse (prin conductoarele rețelei):
 - tensiuni sau curenți induși;
 - tensiuni tranzitorii unidirecționale;
 - tensiuni tranzitorii oscilante;
 - radiate (de către conductoarele rețelei):
 - câmp magnetic;
 - câmp electromagnetic.

- Descărcări electrostatice: determinate de încărcarea electrostatică a corpurilor izolate electric.
- Impulsuri electromagnetice nucleare: explozii nucleare în atmosferă.
Perturbațiile care apar în rețelele electrice pot fi determinate de:
- fenomene naturale cum ar fi trăsnetele, depunerile excesive de gheață, vânt puternic etc;
- fenomene artificiale, cum ar fi acelea care se produc în cursul exploatării echipamentelor de producere, transport, distribuție și utilizare a energiei electrice, spre exemplu:
 - procese de conectare și deconectare;
 - inducția circuitelor conductoare;
 - armonici;
 - nesimetrii etc.

Fenomenele electromagnetice care apar în cadrul unui sistem electroenergetic se pot clasifica în:

- a) Fenomene tranzitorii care se referă la variații rapide ale tensiunii și curentului electric; pot fi:
 - regimuri tranzitorii de tip impuls, fiind determinate de:
 - lovituri de trăsnet;
 - închiderea și deschiderea aparatajului de comutație;
 - conectarea/deconectarea sarcinii.
 - Regimuri tranzitorii oscilante, pot apare datorită:
 - comutării elementelor de rețea;
 - comutării bateriilor de condensatoare;
 - conectării/deconectării sarcinilor.
- b) Regimul staționar sau cvasistaționar, care apare ca urmare a modificării sarcinilor conform curbelor de sarcină, iar regimul generatoarelor se modifică și el corespunzător. Pe durata lui pot apărea următoarele perturbații:
 - întreruperi;
 - goluri de tensiune;
 - supratensiuni temporare.
- c) Fluctuații de tensiune sunt variații sistematice sau aleatoare ale valorii efective sau ale valorii de vârf sau variații ciclice ale curbei tensiunii. Aceste fluctuații sunt datorate:
 - sarcinii intermitente ;
 - pornirii repetate ale motoarelor;
 - cuptoarelor cu arc;
 - sudare electrică.
- d) Poluarea armonică datorată prezenței sarcinilor neliniare; se datorează:
 - sarcinilor neliniare;
 - rezonanțelor armonice în rețeaua de alimentare.

În încheierea acestui paragraf în Tabelul 3.1 se prezintă o clasificare a perturbațiilor care apar într-un sistem electroenergetic conform standardului EN 50160/1999 [EN50160].

3.1.2. Terminologie folosită în problematica calității energiei electrice

Comunitatea Europeană în directiva Consiliului nr. 89/336/CEE din 03.05.89 se referă la calitatea energiei electrice în contextul larg al compatibilității

electromagnetice precizând obligațiile care revin statelor membre în protecția rețelelor electrice de distribuție a energiei electrice, contra perturbațiilor electromagnetice.

Tabelul 3.1. Caracteristicile variațiilor de tensiune din sistemul electroenergetic.

Categorie	Tip	Caracteristici	Durață tipică	Valoare tipică a tensiunii	
Fenomene tranzitorii	Impulsuri	front $\leq 5\text{ns}$	$< 50\text{ns}$		
		Front $\leq 1\mu\text{s}$	$50\text{ns} - 1\text{ms}$		
		front $\leq 0.1\text{ms}$	$> 1\text{ms}$		
	Oscilații	Joasă frecvență	$< 5\text{kHz}$	$0,3 - 50\text{ms}$	0-4 u.r.
		medie frecvență	$5 - 500\text{kHz}$	$20\mu\text{s}$	0-8 u.r.
		înalță frecvență	$0,5 - 5\text{MHz}$	$5\mu\text{s}$	0-4 u.r.
Variații de scurtă durată	Instantanee	înteruperi		$10 - 600\text{ms}$	$< 0,1$ u.r.
		goluri		$10 - 600\text{ms}$	$0,1 - 0,9$ u.r.
		supratensiuni		$10 - 600\text{ms}$	$1,1 - 1,8$ u.r.
	Momentane	înteruperi		$0,6 - 3\text{s}$	$< 0,1$ u.r.
		goluri		$0,6 - 3\text{s}$	$0,1 - 0,9$ u.r.
		supratensiuni		$0,6 - 3\text{s}$	$1,1 - 1,4$ u.r.
	Temporare	înteruperi		$3 - 60\text{s}$	$< 0,1$ u.r.
goluri			$3 - 60\text{s}$	$0,1 - 0,9$ u.r.	
supratensiuni			$3 - 60\text{s}$	$1,1 - 1,2$ u.r.	
Variații de lungă durată	Înteruperi			< 1 minut	0 u.r.
	Variații lente de tensiune			> 1 minut	$1,1 - 1,2$ u.r.
Nesimetria sistemului de tensiuni			Regim permanent	$0,5 - 2$ %	
Regim deformant	Componenta continuă		Regim permanent	$0 - 0,1$ %	
	Armonici		$n = 1 \dots 100$	Regim permanent	$0 - 20$ %
	Interarmonici		$(0 - 6)\text{kHz}$	Regim permanent	$0 - 2$ %
	Zgomot		Bandă largă	Regim permanent	$0 - 1$ %
Variația frecvenței			$< 10\text{s}$		
Flicker			$< 25\text{kHz}$	Intermitent	$0,1 - 7$ %

Principalele noțiuni și termeni utilizați în abordarea calității energiei electrice se referă la:

- *Compatibilitate electromagnetică* (CEM): aptitudinea unui dispozitiv, echipament sau sistem de a funcționa în mediul său electromagnetic în condiții satisfăcătoare și fără să producă el însuși perturbații electromagnetice intolerabile pentru tot ce se află în jur.
- *Nivel de compatibilitate electromagnetică*: nivel maxim specificat al perturbațiilor electromagnetice la care este de așteptat ca să fie supus un dispozitiv, un echipament sau un sistem, care lucrează în anumite condiții. Nivelul de compatibilitate este o valoare de referință care permite să se coordoneze emisia și imunitatea echipamentelor, ce fac parte sau nu din aceeași rețea, pentru a asigura CEM în ansamblu sistemului (CEI-1000-3-6). De

menționat că în practică nivelul de compatibilitate electromagnetică nu este un maxim, el putând fi depășit cu o mică probabilitate, în mod obișnuit 5%.

- *Nivel de planificare*: nivel al perturbațiilor electromagnetice, utilizat în scopul de planificare pentru a evalua impactul asupra rețelei de alimentare a sarcinilor utilizatorului. De menționat că nivelul de planificare este inferior nivelului de compatibilitate.
- *Perturbație electromagnetică*: orice fenomen electromagnetic care poate degrada performanțele unui dispozitiv, echipamentul sau sistemul, sau care poate afecta defavorabil materia vie sau inertă.
- *Nivel de perturbare*: mărime statistică care exprimă valoarea unui fenomen electromagnetic, capabil să perturbe funcționarea unui dispozitiv, echipament sau sistem (CEI-1000-2-1).
- *Nivel total de perturbație*: valoarea unei perturbații electromagnetice date, determinată de suprapunerea emisiei tuturor componentelor unor instalații, într-un sistem dat și măsurată printr-o metodă specifică.
- *Limită de perturbație*: nivel de perturbație maxim admis, măsurat printr-o metodă specifică.
- *Emisie electromagnetică*: fenomen prin care energia electromagnetică este transmisă de la o sursă.
- *Nivel de emisie al unei surse perturbatoare*: nivelul unei perturbații electromagnetice de formă dată, emisă de un anumit dispozitiv, echipament sau sistem și măsurată într-un mod specific.
- *Limită de emisie a unei surse perturbatoare*: valoare maximă specificată a nivelului de emisie a unei surse de perturbații electromagnetice.
- *Marjă de emisie*: diferență între nivelul de compatibilitate electromagnetică și limita de emisie a unui dispozitiv, echipament sau sistem.
- *Imunitate la o perturbație*: aptitudinea unui dispozitiv, echipament sau sistem de a funcționa, fără a se degrada în prezența unei perturbații electromagnetice.
- *Nivel de imunitate*: nivel maxim al unei perturbații electromagnetice, de formă dată, aplicată asupra unui dispozitiv, echipament sau sistem, pentru care acesta rămâne capabil să funcționeze la un grad precis de performanță.
- *Limită de imunitate*: valoarea minimă a nivelului de imunitate.
- *Marjă de imunitate*: diferența între limita de imunitate a unui dispozitiv, echipament sau sistem și nivelul de compatibilitate electromagnetică.
- *Marjă de compatibilitate electromagnetică*: diferența între limita de imunitate a unui dispozitiv, echipament sau sistem și limita de emisie a sursei perturbatoare.
- *Susceptibilitate electromagnetică*: inaptitudinea (incapacitatea) unui dispozitiv, echipament sau sistem de a funcționa, fără a se degrada în prezența unei perturbații electromagnetice.
- *Nivel de susceptibilitate al echipamentului*: nivel de perturbație care poate afecta funcționarea echipamentului; trebuie să fie egal sau mai mare decât nivelul de imunitate, stabilit prin normative.
- *Clase de mediu electromagnetice*: se definesc în funcție de influențele pe care le pot avea perturbațiile rețelei sistemului asupra funcționării aparatelor. Pot fi: clasa 1, clasa 2, clasa 3.
- *Punct comun de cuplare PCC*: punct de cuplare la rețeaua publică de alimentare, la sistemul la care este studiat sau va fi racordat.
- *Sursele de perturbații*: pot fi definite de o repartiție probabilistică $p(d)$ în care d este perturbația, iar p densitatea de probabilitate a perturbației.

- *Imunitatea echipamentelor din rețelele electrice*: este definită prin probabilitatea de susceptibilitate $P(d)$. Echipamentele se încearcă la nivelul test de imunitate mai mare decât nivelul de compatibilitate.
- *Riscul R* ca un echipament să fie afectat de perturbația d este dat de aria cuprinsă sub intersecția celor două curbe reprezentând funcțiile $p(d)$ și $P(d)$, adică:

$$R = \int_0^{\infty} p(d) \cdot P(d) \cdot \delta d \tag{3.1}$$

În Fig.3.1 se prezintă reprezentarea grafică a principiilor compatibilității electromagnetice.

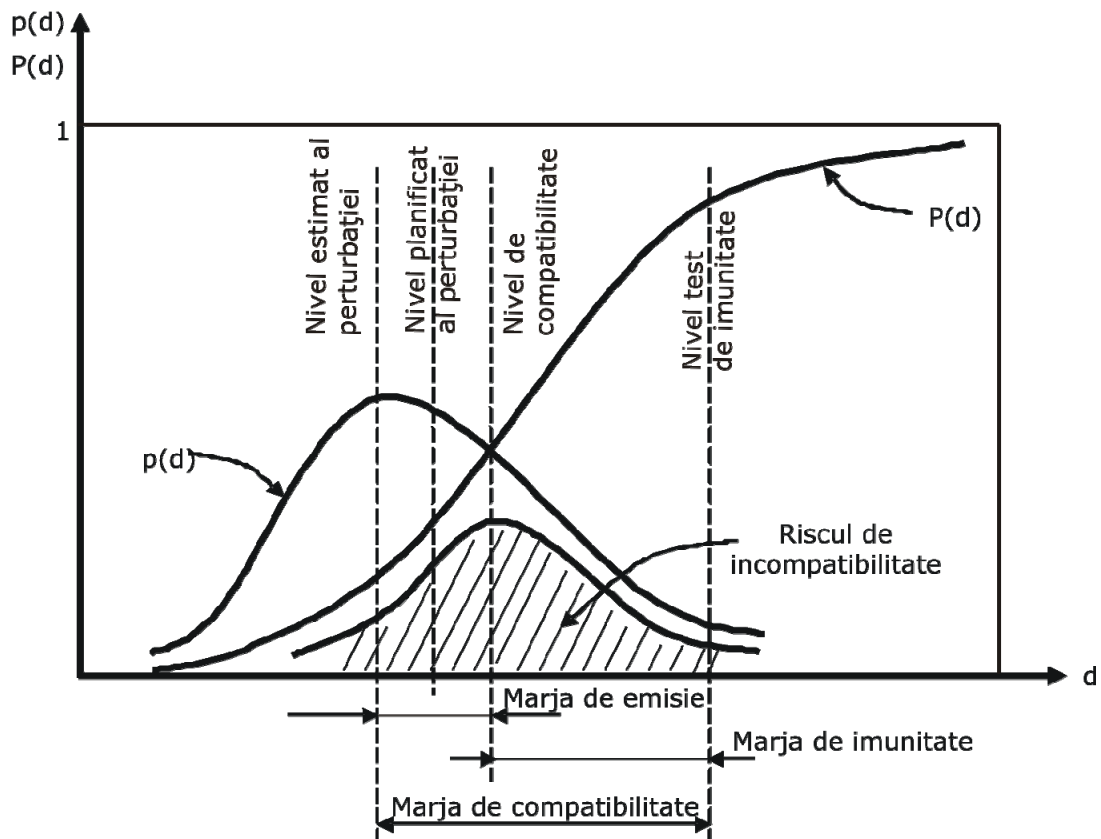


Fig.3.1. Reprezentarea grafică a principiilor compatibilității electromagnetice.

Trebuie remarcat că recunoașterea aspectului aleatoriu al parametrilor CEM este esențială pentru a defini condițiile de compatibilitate electromagnetică a sistemelor.

3.1.3. Niveluri de compatibilitate, acceptabilitate și niveluri de planificare

Nivelurile de compatibilitate sunt, în general, definite prin valori care ar putea fi depășite în cel mult 5% dintre cazuri; valoarea se referă la o rețea completă și se stabilește pe baza repartițiilor statistice reprezentând variațiile parametrilor atât în timp, cât și în spațiu. Rezerva de maxim 5% ia în considerație faptul că un furnizor nu poate garanta nivelurile în toate punctele rețelei și în orice moment.

În general, nivelurile de compatibilitate sunt evaluate pentru ansamblul unei rețele; nu se cunosc metode de evaluare într-un punct anumit. În prezent sunt recomandate, pe plan internațional, niveluri de compatibilitate pentru toate categoriile de perturbații.

Nivelurile de planificare sunt stabilite de către furnizorul de energie electrică pentru toate nivelurile de tensiune ale rețelei și pot fi considerate ca obiective interne de calitate.

Nivelurile de planificare sunt inferioare sau egale cu nivelurile de compatibilitate. Diferențele dintre cele două niveluri nu sunt specificate, având în vedere faptul că nivelurile de planificare diferă de la un caz la altul, depinzând de structura rețelei, dotarea acesteia, nivelul de pregătire al personalului de exploatare etc. În unele cazuri sunt recomandate și niveluri de planificare pentru unele tipuri de perturbații (CEI 1000-3-7).

Determinările pentru evaluarea nivelului real al perturbațiilor este indicat să se efectueze conform unor proceduri recomandate pe plan internațional (CEI 1000-3-7, CEI 1000-4-7), pentru a asigura informații acceptate atât de furnizorul de energie electrică, cât și de consumatori. Pe baza datelor înregistrate, se recomandă efectuarea prelucrării statistice pe intervale standard de timp:

- interval foarte scurt (very short) $T_{vs} = 3 \text{ s};$
- interval scurt (short) $T_{sh} = 10 \text{ min};$
- interval lung (long) $T_l = 1 \text{ h};$
- interval de o zi (one day) $T_d = 24 \text{ h};$
- interval de o săptămână (one week) $T_{wk} = 7 \text{ zile}$

Conceptele de bază pentru procedura de evaluare sunt astfel realizate, încât să pună în evidență relațiile cele mai importante dintre variabilele de bază.

Pe ansamblul unei rețele electrice, se produce inevitabil o interferență a perturbațiilor și, în consecință, poate apărea o suprapunere semnificativă între curbele de repartiție a nivelurilor densităților de probabilitate ale perturbației și ale imunității, determinând riscul de incompatibilitate, care trebuie să fie inferior valorilor admise.

Consumatorii cu cerințe ridicate de siguranță care nu pot accepta riscul luat în calcul pentru definirea nivelurilor de compatibilitate, trebuie să-și procure echipamente cu imunitate mai mare sau să accepte costul unor investiții suplimentare pentru limitarea perturbațiilor sub valorile normate.

Nivelul maxim al perturbației poate fi determinat prin măsurări reale în rețea sau din studii teoretice.

Nivelurile de testare a imunității echipamentelor sunt precizate de norme specifice sau pot fi convenite de fabricanți și utilizatori.

Pe baza analizei caracterului perturbațiilor și a imunității echipamentelor pot fi puse în evidență următoarele concluzii:

- Datorită variației nivelului de perturbație, este dificil sau chiar imposibil de determinat cel mai înalt nivel real de perturbație, care poate apărea foarte rar.
- Nu este economic să se definească nivelul de compatibilitate prin cea mai mare valoare a perturbației, la care cele mai multe echipamente ar putea fi expuse doar pe durate foarte reduse.
- Nivelul de imunitate al unui echipament trebuie să fie cel puțin egal sau mai mare decât nivelul de compatibilitate.
- Se consideră că un echipament care trebuie să funcționeze într-un mediu perturbator, caracterizat prin nivelul de compatibilitate (NC) este adaptat, dacă este insensibilizat la acest mediu, până la un nivel de imunitate (NI), astfel încât: $NI > NC$.

- Nivelul de imunitate trebuie verificat cu un test corespunzător.
- Determinarea valorilor și procedura de testare se face în conformitate cu recomandări internaționale sau este subiectul unui acord între părțile interesate.
- Nivelul de susceptibilitate al echipamentului este nivelul de perturbație care ar putea afecta funcționarea echipamentului, dar trebuie să fie egal sau mai mare decât nivelul de imunitate stabilit prin teste.
- Nivelul de susceptibilitate ar trebui fixat de fabricant ținând seama de condițiile anticipate de funcționare și de limita de imunitate specifică.

Principiile generale, pentru a se evalua dacă o sarcină perturbatoare poate fi acceptată, au la bază două elemente:

- puterea contractată de utilizator;
- puterea echipamentului care produce emisii perturbatoare și caracteristicile rețelei.

Obiectivul urmărit este limitarea injecției, provenind din sarcina totală a consumatorilor individuali, la niveluri care să nu depășească nivelurile de planificare. Se definesc trei stadii de evaluare, care pot fi utilizate succesiv sau independent. În Fig.3.2 se prezintă procedura de evaluare a unei sarcini perturbatoare.

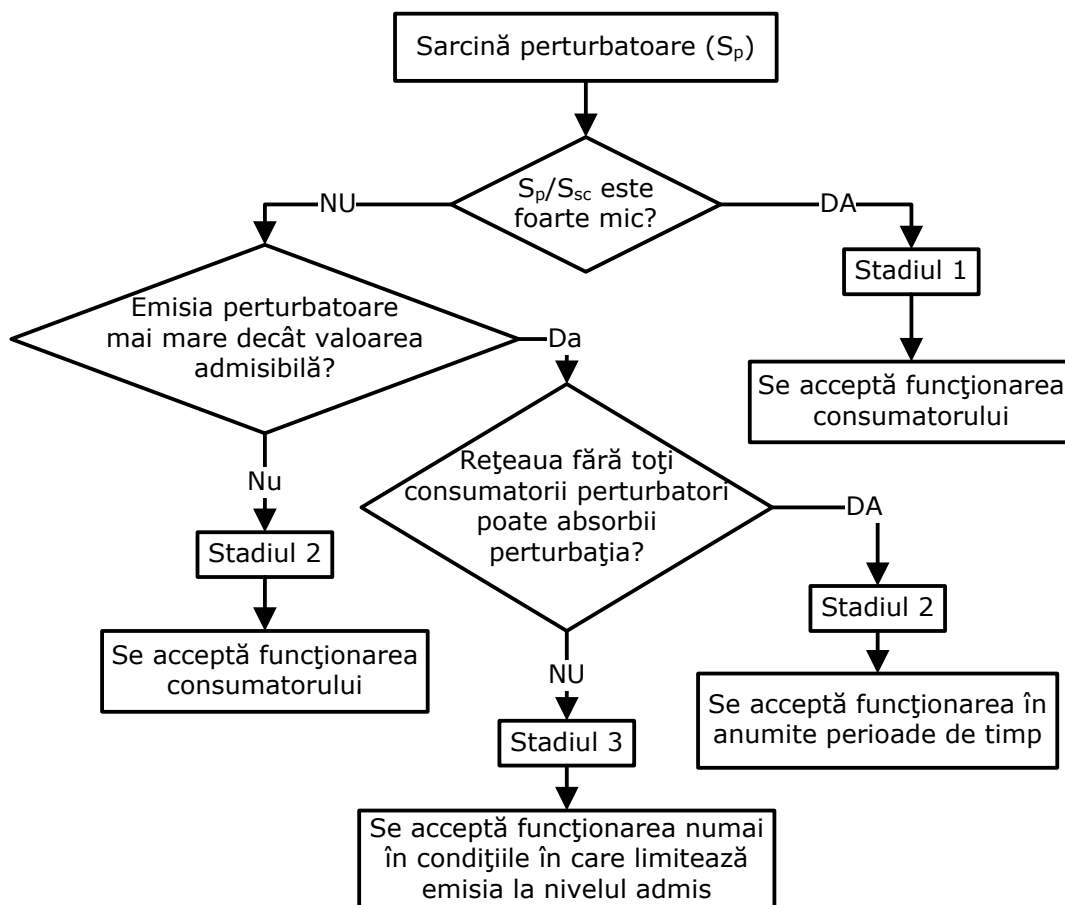


Fig.3.2. Procedura de evaluare a unei sarcini perturbatoare.

Stadiul 1 - O evaluare simplificată a emisie perturbației.

Se admite, în general, că utilizatorii instalează aparate mici, fără o evaluare specifică, din partea furnizorului de energie electrică, a emisie perturbație. Fabricanții unor astfel de aparate sunt, în general, responsabili de limitarea emisiilor (CEI 1000-3-2. CEI 1000-3-3 și CEI 1000-3-5 indică norme pentru familii de

produse din componența echipamentelor racordate la JT; nu există limite pentru MT).

Chiar în absența unor referințe, pentru rețelele de MT și chiar IT, se consideră că, dacă ansamblul sarcinii perturbatoare sau puterea contractată de utilizator este mică în raport cu puterea de scurtcircuit în PCC, nu este necesară o analiză mai detaliată.

Stadiul 2 - Limite de emisie dependente de puterea contractată de utilizator.

Dacă o sarcină nu satisface criteriile stadiului 1, trebuie evaluate caracteristicile particulare ale receptoarelor generatoare de emisii perturbatoare, simultan cu capacitatea de absorbție a rețelei. Capacitatea de absorbție a rețelei este corelată cu nivelul de planificare și este împărțită între utilizatorii individuali, în funcție de puterea lor raportată la puterea totală disponibilă a rețelei. La MT, la alocarea (repartizarea) nivelurilor de emisie perturbatoare, pentru utilizatorii individuali, trebuie să se țină seama și de nivelul de perturbație provenind din rețeaua de tensiune superioară.

Sumarea perturbațiilor provenind de la mai multe surse de emisie (diferită după tipul perturbațiilor) se face după reguli în general cunoscute și indicate în reglementările internaționale.

În principiu, într-o astfel de abordare, dacă rețeaua este la sarcină nominală și toți consumatorii injectează la nivelul limitelor lor individuale alocate, nivelul total al perturbației în rețeaua electrică este egal cu nivelul de planificare.

Stadiul 3 - Acceptarea unor niveluri mai ridicate pe o bază excepțională și temporară.

În cazuri particulare, un utilizator ar putea să primească acordul pentru a emite perturbații peste cele ale limitelor alocate conform stadiului 2. Acest lucru se poate face numai în urma unui studiu de detaliu al caracteristicilor existente și de perspectivă ale rețelei, fără însă a depăși nivelul global admis pentru rețea. Rezerva ar putea să apară în cazul în care nu toți consumatorii funcționează la puterea maximă sau nu toți consumatorii utilizează efectiv nivelul alocat de perturbații fiecăruia dintre ei. Funcționarea unui consumator cu nivele perturbatorii peste cele alocate poate fi acceptată de către furnizorul de energie electrică numai pe o durată determinată de timp până la rezolvarea problemelor consumatorului sau până când condițiile specifice din rețeaua electrică nu mai permit acceptarea acestuia.

3.2. Calitatea tensiunii furnizate. Perturbații ale curbei tensiunii

În cadrul acestui subcapitol vor fi prezentate principalele perturbații care caracterizează calitatea tensiunii de alimentare.

3.2.1. Definiții și terminologie

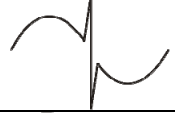
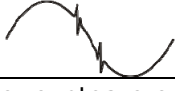
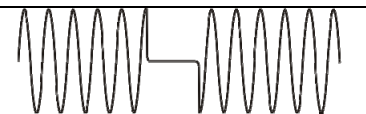
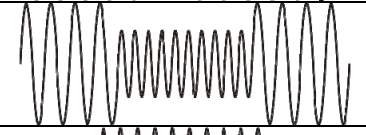
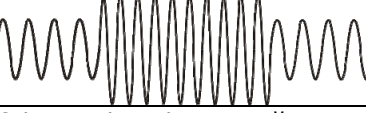

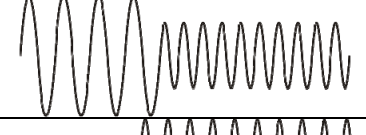
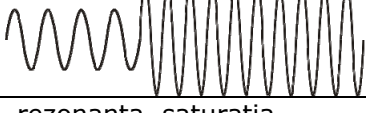
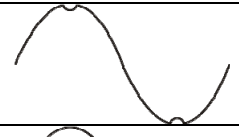
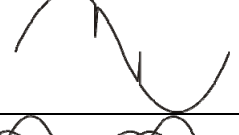

Tensiunea este elementul calitativ principal care condiționează buna funcționare a receptoarelor, motiv pentru care calitatea acesteia definește practic sub un anumit aspect calitatea energiei electrice. În [EN50160] sunt definiți diferiți parametri ai tensiunii. Dintre aceștia cei mai importanți sunt:

- *Tensiunea de alimentare*: valoarea efectivă a tensiunii la un moment dat în PCC, măsurată pe durata unui anumit interval de timp.

- *Tensiunea nominală a sistemului U_n* : este tensiunea pentru care sistemul a fost proiectat sau identificat și corespunde regimului de funcționare stabilit.
- *Regimul normal de funcționare*: corespunde modificării sarcinii conform curbelor de sarcină, comutările și eliminarea defectelor din sistem se efectuează automat cu ajutorul sistemului de protecție în absența unor condiții excepționale datorate influenței exterioare sau a unor evenimente majore.
- *Variația tensiunii*: este creșterea sau descreșterea tensiunii datorită variației sarcinii totale sau a unei părți a acesteia.
- *Flicker*: impresia de instabilitate a senzației vizuale induse de un stimul luminos a cărui luminanță sau distribuție spectrală fluctuează în timp.
- *Nivel de severitate de flicker*: intensitatea flickerului definit pe baza măsurătorilor UIE – IEC și evaluate pe baza următoarelor mărimi (indicatori):
 - severitatea pe termen scurt P_{str} , măsurate pe durata unei perioade de 10 minute;
 - severitatea pe termen lung P_{ltr} , calculată cu o secvență de 12 valori ai indicatorului P_{str} , estimați pe o durată de două ore.
- *Gol se tensiune*: este scăderea bruscă a tensiunii de alimentare la valori cuprinse între 90% și 10%. Convențional durata unui gol de tensiune este cuprinsă între 10ms și 1min. Mărimea golului de tensiune este definită ca fiind diferența dintre valoarea efectivă minimă a tensiunii pe durata golului și valoarea nominală a tensiunii U_n . Modificările de tensiune care nu conduc la valori mai mici de 90% din tensiunea nominală U_n nu sunt considerate goluri.
- *Întreruperea alimentării*: este regimul în care tensiunea la bornele de alimentare este mai mică decât 1% din tensiunea nominală U_n . Întreruperile alimentării pot fi clasificate în:
 - planificate, ca urmare a unor lucrări care se efectuează în cadrul sistemului;
 - accidentale, provocate de defecte permanente sau tranzitorii în majoritate cauzate de evenimente exterioare.
- *Supratensiuni de frecvență industrială temporară*: sunt datorate în mare parte operațiilor de comutare sau defectelor, adică reducerea bruscă a sarcinii sau deconectării scurtcircuitelor. Au durata relativ mare, de obicei câteva perioade corespunzător frecvenței industriale f .
- *Supratensiuni tranzitorii*: la care partea amortizată a tensiunii are durată scurtă, de câteva milisecunde, spre exemplu deconectarea unui scurtcircuit. Pot fi oscilatorii sau neoscilatorii.
- *Tensiunea armonică*: tensiune sinusoidală cu frecvența egală cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale a tensiunii de alimentare. Tensiunile armonice pot fi evaluate:
 - individual prin amplitudinea U_h relativă la tensiunea fundamentală U_1 , unde h este ordinul armonicii;
 - global, obișnuit prin factorul total de distorsiune THD_v .
- *Tensiune interarmonică*: este o tensiune sinusoidală cu frecvența cuprinsă între armonici de frecvență egală cu multiplu întreg al fundamentalei.
- *Dezechilibrul tensiunii*: este un regim în care valorile efective ale tensiunii fazelor sau unghiului dintre fazele consecutive ale unui sistem trifazat nu sunt egale.

În Tabelul 3.2 se prezintă caracteristicile principalelor perturbații de tensiune [Eremia2006].

Tabelul 3.2. Caracteristicile principalelor perturbații de tensiune.

Categorie	Caracteristici			
	Frecvență	Durata	Amplitudine	Forma de variație a perturbației
Supratensiuni tranzitorii cauzate de lovituri de fulger, fenomenelor de comutație				
Impuls	ns până la ms	(50ns-1ms)	0 – 10 u. r.	
Oscilație	1kHz până la 10MHz	(1μs-50ms)	0 – 6 u. r.	
Variații de scurtă durată – scurtcircuite, pornirea unor mari motoare, cuptoare cu arc electric				
Întreruperi	Colaps	(10ms-3s)	100%	
Gol de tensiune	Frecvență industrială	(0.5perioade, 50 perioade)	0,1 – 0,9 u. r.	
Supratensiuni	Frecvență industrială	(0.5perioade, 50 perioade)	1,1 – 1,8 u. r.	
Variații de lungă durată – defecte apropiate, declanșări false, goluri de sarcină				
Întreruperi	Colaps	(3s – 1 min)	100%	
Sub-tensiuni (goluri)	Frecvență industrială	> 1 min	0,8 – 0,9 u.r.	
Supratensiuni	Frecvență industrială	> 1 min	1,1 – 1,2 u.r.	
Distorsiuni ale formei curbei tensiunii – sarcini neliniare, rezonanța, saturația transformatoarelor, sarcini monofazate				
Armonici	Ordinul 0-40	Continue	0 – 25%	
Crestături	Bandă largă	Continue	0 – 10%	
Tensiuni nesimetrice	Frecvență industrială	Continue	< 3%	

Pentru a realiza un studiu referitor la calitatea tensiunii furnizate, în continuare se vor trata câțiva indicatori specifici fluctuațiilor și golurilor de tensiune, precum și indicatori specifici regimului deformant și dezechilibrat.

3.2.2. Indicatorii golurilor de tensiune

Golul de tensiune este definit ca fiind o reducere pe o durată Δt_g determinată (în mod obișnuit 3 secunde) a amplitudinii sau a valorii efective a tensiunii unei rețele electrice într-un punct al acesteia.

Amplitudinea ΔU_g a golului de tensiune poate avea valori de $(0,1 - 0,9)U_n$, în care U_n este tensiunea nominală.

a) Matricea de monitorizare.

Conform SR-EN 50160, în România, pentru caracterizarea completă a golurilor de tensiune pe durata de referință, se operează cu matricea amplitudine – durată (Tabelul 3.3) [SREN50160].

Tabelul 3.3. Matricea de monitorizare a golurilor și întreruperilor de tensiune.

Δt_g (s) \ U/U _c	0,01-0,02	0,02-0,1	0,1-0,5	0,5-1	1-3	3-20	20-60	60-180
> 1,1								
1,1...0,9	t_{real}/T_r							
0,9...0,85								
0,85...0,70								
0,70...0,40								
0,40...0,1								
0,1...0,0								

În Tabelul 3.3 s-au notat:

U – tensiunea reală măsurată;

U_c – tensiunea contractată;

Δt_g – durata golului de tensiune sau a întreruperii;

t_{real} – durata totală în care tensiunea a fost în banda admisibilă;

T_r – durata de referință (perioada de timp în care s-a făcut monitorizarea – de obicei se alege un an).

Matricea de monitorizare a golurilor și întreruperilor de tensiune permite punerea în evidență a supratensiunilor ($U/U_c > 1.1$), a duratei relative de funcționare în banda admisă (t_{real}/T_r), a duratei și amplitudinii golurilor de tensiune ($0.1 < U/U_c < 0.9$ și $\Delta t_g < 3s$), a duratei întreruperilor de scurtă durată ($U/U_c < 0.1$ și $\Delta t_g < 3s$), și a celor de lungă durată ($U/U_c < 0.1$ și $\Delta t_g > 3s$).

b) frecvența de apariție a golurilor

$$f_a = \frac{N_g}{T_r} \quad (3.2)$$

unde: N_g este numărul de goluri de tensiune care apar pe durata de referință T_r (în mod uzual 1 an). Acesta poate fi calculat din matricea de monitorizare a golurilor de tensiune.

c) *factorul de performanță* este unul dintre cei mai importanți indicatori de calitate a energiei electrice relativ la golurile, întreruperile de tensiune și supratensiuni. El este definit ca fiind intervalul relativ de timp (t_{real}/T_r), în care tensiunea se găsește în bandă admisă.

d) *pierderea de tensiune* (L_U) este definită cu relația (3.3):

$$L_U = \int_0^T (1 - U(t)) dt \quad (3.3)$$

unde $U(t)$ este valoarea efectivă în u.r.n. a tensiunii în momentul t .

Pentru a calcula integrala din relația (3.3) trebuie definită durata de integrare (T). Modul de definire a acestei durate este foarte important pentru golurile de tensiune care au o revenire lentă la tensiunea nominală (cazul pornirii motorului asincron) deoarece poate conduce la rezultate foarte diferite.

Pentru situația în care golul de tensiune este de formă dreptunghiulară, relația (3.3) devine:

$$L_U = (1 - U_R) \cdot \Delta t_g \quad (3.4)$$

unde U_R reprezintă valoarea remanentă a tensiunii pe durata golului.

e) *indicele energetic* – E_{VS} (Voltage Sag Energy) reprezintă pierderea de energie pe durata golului de tensiune. El este definit de relația (3.5) [IEEE1564].

$$E_{VS} = \int_0^T \left[1 - \left(\frac{U(t)}{U_n} \right)^2 \right] dt \quad (3.5)$$

Și în această situație durata de definiție a integralei este foarte importantă pentru golurile de tensiune care au o revenire lentă. Pentru goluri de tensiune de formă dreptunghiulară rezultă:

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{U_R}{U_n} \right)^2 \right] \cdot \Delta t_g \quad (3.6)$$

Pentru golurile de tensiune trifazate indicele energetic se poate calcula cu relația (3.7).

$$E_{VS} = E_{VS-A} + E_{VS-B} + E_{VS-C} \quad (3.7)$$

Cu ajutorul indicelui energetic se poate defini *indicele energetic total* – SEI (Sag Energy Index) ca fiind energia pierdută datorită golurilor de tensiune pe o durată de referință care poate fi o lună sau un an [IEEE1564].

$$SEI = \sum_{i=1}^{N_g} E_{VS-i} \quad (3.8)$$

Dacă raportăm acest indice la energia medie vehiculată în unitatea de timp, se poate determina o durată echivalentă de întrerupere a tensiunii în care s-ar obține aceeași pierdere de energie.

Din acest indice se poate determina *indicele energetic mediu* – $ASEI$ (Average Sag Energy Index) ca fiind pierderea medie de energie, datorate unui gol de tensiune, pe perioada de studiu considerată [IEEE1564].

$$ASEI = \frac{1}{N_g} \cdot \sum_{i=1}^{N_g} E_{VS-i} \quad (3.9)$$

e) *indicele de severitate* (S_e) este definit cu ajutorul amplitudinii tensiunii și a duratei golului de tensiune, prin raportare la curbele de acceptabilitate SEMI (CBEMA sau ITIC) [IEEE1564].

$$S_e = \frac{1 - U}{1 - U_{ref}(d)} \quad (3.10)$$

unde $U_{ref}(d)$ este amplitudinea unui gol de tensiune de durată d pe curba de referință la care ne raportăm.

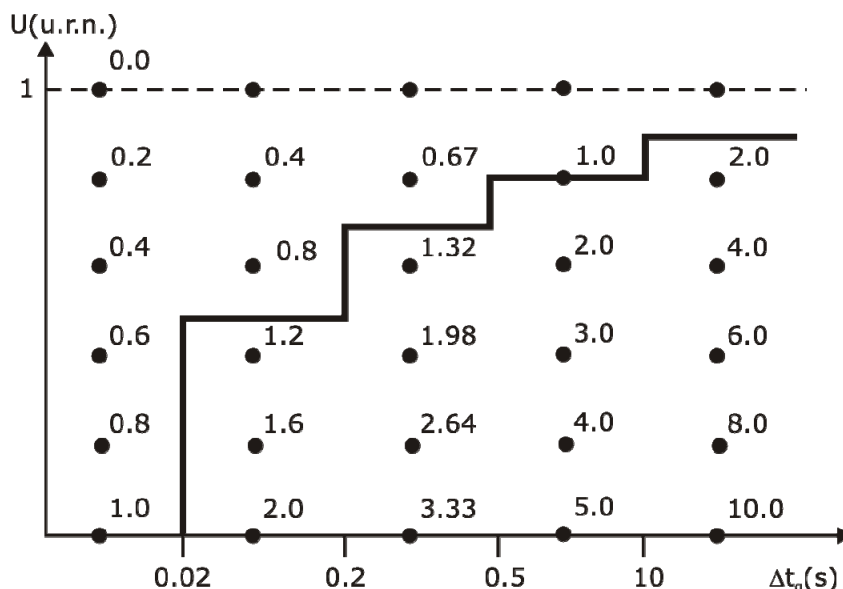


Fig.3.3. Indicele de severitate a golului de tensiune calculat în raport cu curba de acceptabilitate SEMI.

Dacă ne raportăm la curba de acceptabilitate SEMI (Fig.3.3), indicele de severitate poate să ia următoarele valori:

- $S_e=0$ dacă amplitudinea tensiunii are valoarea 1 în u.r.n;
- $0 < S_e < 1$ pentru perturbațiile care sunt distribuite deasupra curbei de referință;
- $S_e=1$ pentru perturbațiile care se suprapun pe curba de referință;
- $S_e > 1$ pentru perturbațiile care sunt sub curba de referință.

În concluzie se poate spune că indicele de severitate este cu atât mai mare cu cât amplitudinea golului de tensiune este mai mică sau cu cât durata golului de tensiune este mai mare.

3.2.3. Indicatorii fluctuațiilor de tensiune

Variațiile rapide sau fluctuațiile de tensiune reprezintă variații ale valorilor efective sau de vârf ale curbei de tensiune în limitele a $\pm 10\%$, produse în domeniul de frecvență 0,003–25 Hz cu periodicități de 40ms – 5min.

Din studiile realizate s-a constatat că pentru variații de tensiune de amplitudini mici dar la frecvențe de 8-10 Hz, apare o stare de indispoziție pentru observatorul uman, mai ales în cazul în care acesta privește la televizor sau citește.

Fluctuațiile de tensiune sunt provocate de funcționarea cu șocuri de putere reactivă a unor receptoare cum ar fi:

- frigider, ascensoare, aparate de sudură în rețelele de joasă tensiune;
- pompe, locomotive electrice, laminoare în rețelele de medie tensiune;
- cupatoare cu arc electric, laminoare în rețele de înaltă tensiune.

Pentru caracterizarea efectului de flicker se folosesc următorii indicatori:

a) Indicator de flicker instantaneu P , este evaluat pe baza variațiilor de tensiune pe barele de alimentare. Valoarea $P=1$ corespunde pragului convențional de iritabilitate și se determină din curba de iritabilitate indicată în Fig.3.4 pentru variații dreptunghiulare de tensiune [Buta2001].

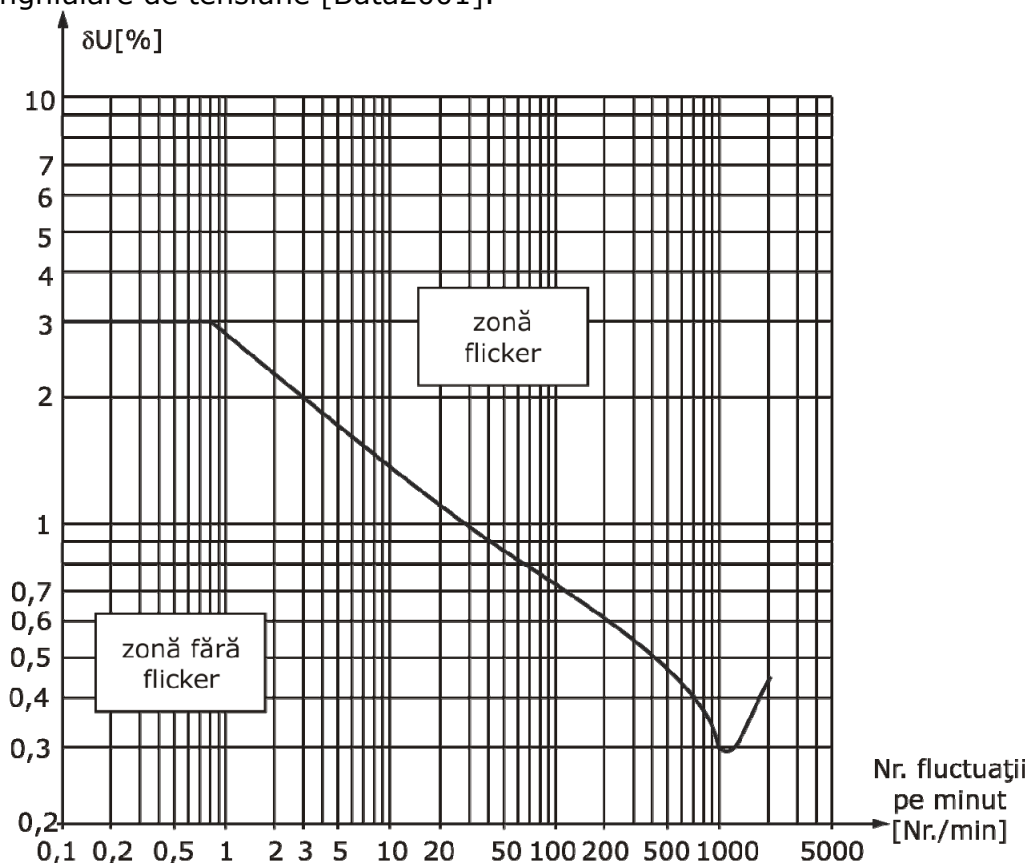


Fig.3.4. Caracteristica $P=1$ (curba de iritabilitate) pentru variații dreptunghiulare și echidistante de tensiune.

Pentru a lua în considerare mecanismul real de jenă fiziologică, valorile variațiilor de tensiune se ponderează cu factori de corecție dependenți de forma variației. Valorile astfel obținute se compară cu curba de iritabilitate și se stabilește probabilitatea de depășire a acestei curbe.

Estimarea efectului de jenă fiziologică impune o evaluare pe un interval semnificativ de timp (de obicei 10 minute). Zona de sub curbă este zona fără flicker iar zona de deasupra curbei este zona cu flicker.

b) Indicatorul de flicker pe termen de timp scurt P_{st} (short-term) rezultă pe baza unei prelucrări statistice a nivelurilor instantanee P , pe un interval determinat de timp (obișnuit 10 minute) [IEC61000-4-15]. Nivelurile instantanee, stabilite spre exemplu la fiecare 15s, sunt utilizate pentru construcția unei curbe de probabilitate cumulată (CFP – Cumulative Probability Function), care permite determinarea probabilității de depășire a unei anumite valori (Fig.3.5).

Informațiile obținute din curba CFP pe intervalul de 10 minute permit calculul lui P_{st} din relația:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{1s} + 0,0657 \cdot P_{3s} + 0,28 \cdot P_{10s} + 0,08 \cdot P_{50s}} \quad (3.11)$$

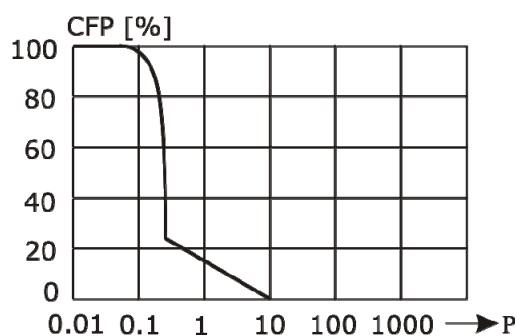


Fig.3.5. Curba de probabilitate cumulată pentru variațiile sub formă de flicker pe barele de alimentare ale unui cuptor electric.

Valorile $P_{0,1}$; P_{1s} ; P_{3s} ; P_{10s} ; P_{50s} ; reprezintă niveluri ale flickerului depășite în 0,1%; 1%; 3%; 10% și respectiv 50% din timp pe intervalul de observație. De menționat că indicele s al mărimilor de mai sus, semnifică faptul că trebuie considerate valorile netezite (smoothed value), adică:

$$\begin{aligned}
 P_{50s} &= \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \\
 P_{10s} &= \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \\
 P_{3s} &= \frac{P_2 + P_3 + P_4}{3} \\
 P_{1s} &= \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Constanta de timp de 0,3s a memoriei flickermetrului asigură ca $P_{0,1}$ să nu se modifice într-un mod brusc și deci nu este necesară netezirea pentru această valoare.

c) *Indicatorul de flicker pe termen lung* P_{lt} (long-term), de regulă 2 ore. Este definit de relația [IEC61000-4-15]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} P_{st-j}^3} \tag{3.13}$$

unde P_{st-j} sunt cele 12 valori succesive ale indicatorului de timp scurt, determinate pe intervalul de două ore.

Conform SREN 50160, în condiții normale de exploatare în timpul fiecărei perioade de o săptămână, $P_{lt} \leq 1$ pentru 95% din timp.

Conform PE 142/2001 nivelurile de compatibilitate în rețelele de joasă tensiune și medie tensiune sunt $P_{st}=1$ și $P_{lt}=0,8$ și ele sunt în general relative la o probabilitate care nu depășește 95%.

3.2.3. Indicatorii regimului nesinusoidal

Regimul nesinusoidal (deformant) prezent în rețelele sistemului electroenergetic se manifestă prin distorsiuni (sau deformări) ale curbei de curent sau tensiune de la forma sinusoidală.

O tensiune perfect sinusoidală aplicată unui consumator neliniar conduce la un regim deformant. Din acest punct de vedere putem avea trei tipuri de

consumatori care produc regim deformant: consumatori care funcționează pe principiul arcului electric (cuptoare cu arc electric, lămpi cu descărcări în gaze, aparate de sudură electrice), consumatori care utilizează convertoare cu semiconductori (toate echipamentele care funcționează în curent continuu) și consumatori care funcționează în regim de saturație magnetică a miezului de fier.

Distorsiunile armonice într-o rețea electrică se pot întâlni sub formă de: componentă continuă, armonici, interarmonici, impulsuri de comutație, zgomote. Dintre acestea în mod deosebit interesează: componenta continuă, armonicile și interarmonicile.

Componenta continuă este determinată de prezența unei tensiuni sau a unui curent continuu, într-un sistem electroenergetic de tensiune alternativă. Ea poate apare ca efect a unor redresări monoalternanță.

Armonicile sunt curenți sau tensiuni sinusoidale, având o frecvență multiplu întreg al frecvenței fundamentale (la noi în țară 50 Hz). Nivelul distorsiunii poate fi descris prin spectrul armonic, cu indicarea amplitudinii și a defazajului pentru fiecare armonică. Identificarea spectrului armonic se efectuează prin *analiza armonică*. Aceasta reprezintă operația de descompunere a unei oscilații periodice oarecare în oscilații armonice ale căror frecvențe sunt multipli întregi ai frecvenței fundamentale [Eremia2006].

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k) \quad (3.14)$$

unde:

$f(t)$ reprezintă valoarea instantanee a curbei distorsionate analizate;

c_0 – componenta continuă a funcției $f(t)$;

k – numărul de ordine al armonicii;

c_k – amplitudinea armonicii de frecvență f_k ;

ω_1 – pulsația pe frecvența fundamentală;

t – momentul de timp analizat;

θ_k – unghiul de defazaj al armonicii de ordinul k față de fundamentală pentru momentul $t=0$.

Amplitudinea și unghiul de defazaj pentru oricare armonică se poate determina cu relațiile (3.15).

$$\begin{aligned} c_k &= |b_k + ja_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \theta_k &= \arctan(a_k/b_k) \text{ pentru } b_k \geq 0 \\ \theta_k &= \pi + \arctan(a_k/b_k) \text{ pentru } b_k < 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

unde:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt ; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt ; \quad c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.16)$$

Valoarea efectivă a funcției $f(t)$ se calculează cu relația (3.17).

$$C_{ef} = \sqrt{c_0^2 + \sum_{k=1}^{k_{max}} \left(\frac{c_k}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (3.17)$$

Pentru definirea gradului de deviație a curbei tensiunii față de forma sinusoidală, se definesc câțiva indicatori [EN50160] care să poată fi comparați cu cerințele standardelor internaționale.

a) *frecvența armonică* (f_k), reprezintă o valoare care este multiplu a frecvenței fundamentale (f_1).

$$f_k = k \cdot f_1 \quad (3.18)$$

b) *ordinul armonicii* (k), care reprezintă raportul dintre frecvența armonicii și frecvența fundamentală.

$$k = \frac{f_k}{f_1} \quad (3.19)$$

c) *valoarea efectivă a componentei armonice* (C_k).

$$C_k = \frac{c_k}{\sqrt{2}} \quad (3.20)$$

d) *nivelul armonicii* (TF_k).

$$TF_k = \frac{C_k}{C_1} \quad (3.21)$$

La noi în țară nivelul armonicii se definește conform relației (3.22) ca fiind raportul procentual dintre valoarea efectivă a armonicii și valoarea efectivă a fundamentalei pentru mărimea luată în considerare [Buta2001].

$$\begin{aligned} \gamma_{kU} &= \frac{U_k}{U_1} \cdot 100\% \\ \gamma_{kI} &= \frac{I_k}{I_1} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (3.22)$$

e) *factorul total de distorsiune* (THD - Total Harmonic Distortion).

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{k_{max}} \left(\frac{C_{ef-k}}{C_{ef-1}} \right)^2} \quad (3.23)$$

În [IEC61000-2-2] factorul de distorsiune se definește ca fiind raportul exprimat în procente dintre reziduul deformant U_d , I_d și valoarea efectivă a fundamentalei, conform relației (3.24).

$$\delta_U = \frac{U_d}{U_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U_1} \cdot 100 \% ; \quad \delta_I = \frac{I_d}{I_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} \cdot 100 \% \quad (3.24)$$

În țara noastră, conform PE 143/2001 se consideră drept indicatori ai armoniilor: rangul armoniceii, nivelul acesteia și factorul de distorsiune pentru tensiune și/sau curent electric.

Nivelurile de compatibilitate legate de regimuri nesinusoidale sunt în general relative la o probabilitate care nu depășește 95%. Nivelurile de compatibilitate ale tensiunilor armonice conform [EN50160] sunt prezentate în Tabelul 3.4 [Eremia2006]. În Tabelul 3.5 se prezintă nivelele de compatibilitate ale tensiunilor armonice conform [IEC61000-2-2] pentru joasă tensiune și [IEC61000-3-6] pentru medie și înaltă tensiune.

Tabelul 3.4. Valori recomandate pentru nivelurile de planificare ale tensiunilor armonice (% din tensiunea nominală) conform standardului [EN50160].

Rang impar nemultiplu de 3		Rang impar multiplu de 3		Rang par	
Rang k	Tensiunea armonică [%]	Rang k	Tensiunea armonică [%]	Rang k	Tensiunea armonică [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \cdot (17/k) - 0.27$	$21 < h < 45$	0.2	$10 < h < 50$	$0.25 \cdot (10/k) + 0.25$

Tabelul 3.5. Valori recomandate pentru nivelurile de planificare ale tensiunilor armonice (% din tensiunea nominală) pentru rețelele de JT [IEC61000-2-2], MT, ÎT [IEC61000-3-6].

Rang impar nemultiplu de 3			Rang impar multiplu de 3			Rang par					
Rang k	Tensiunea armonică [%]			Rang k	Tensiunea armonică [%]			Rang k	Tensiunea armonică [%]		
	JT	MT	ÎT		JT	MT	ÎT		JT	MT	ÎT
5	6	5,0	2,0	3	5	4,0	2,0	2	2	1,6	1,5
7	5	4,0	2,0	9	1,5	1,2	1,0	4	1	1,0	1,0
11	3,5	3,0	1,5	15	0,3	0,3	0,3	6	0,5	0,5	0,5
13	3	2,5	1,5	21	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,4	0,4
17	2	1,6	1,0	>21	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,4	0,4
19	1,5	1,2	1,0					12	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,2	0,7					>12	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,2	0,7								
>25	$0,2 + 1,3 \cdot 25/k$										

În România, procedura de evaluare a nivelului de perturbație se face conform standardului românesc [SREN61000-4-7], pe un interval de o săptămână. Este de dorit ca:

- valoarea maximă zilnică, corespunzătoare probabilității cumulate de 95%, ca medie pătratică a eșantioanelor pe o perioadă foarte scurtă de 3s, pentru fiecare rang armonic U_k să nu depășească nivelul de planificare;
- valoarea maximă săptămânală, ca medie pătratică a eșantioanelor pe o perioadă scurtă de 10 minute, pentru fiecare rang armonic U_k să nu depășească nivelul de planificare;
- valoarea maximă săptămânală a lui U_k să nu depășească 1,5–2 din nivelul de planificare.

3.2.4. Indicatorii regimului nesimetric

Se poate spune că la bornele unui consumator avem un sistem simetric de tensiuni dacă tensiunile pe fază sunt egale în modul și sunt defazate între ele cu un unghi de 120°. Generatoarele sincrone sunt astfel realizate încât să furnizeze în rețea un sistem de tensiuni trifazate simetrice. Prin urmare, pentru ca la bornele consumatorului să avem același sistem de tensiuni, trebuie ca elementele componente ale rețelei să fie liniare și simetrice, iar încărcare cu sarcină pe fiecare fază, să aibă aceiași valoare pentru toate cele trei fazele.

Nesimetria tensiunilor într-un sistem trifazat este definită ca și o situație în care tensiunile pe cele trei faze nu mai sunt egale în modul, sau unghiul dintre vectorii formați de cele trei tensiuni diferă de 120° [Baggini2008].

Regimul nesimetric permanent poate fi determinat de:

- sarcini inegale pe cele trei faze ale rețelei de alimentare;

- receptoare monofazate repartizate inegal pe cele trei faze;
- receptoare bifazate (aparate de sudare electrică, cuptoare electrice, tracțiune electrică etc);
- receptoare trifazate dezechilibrate (cuptoare cu arc electric);
- impedanțe diferite ale liniilor electrice pe cele trei faze.

Pentru a defini indicatorii regimului deformant se pornește de la descompunerea în componente simetrice.

$$\begin{aligned}\underline{U}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \\ \underline{U}_+ &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C) \\ \underline{U}_- &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)\end{aligned}\quad (3.25)$$

unde $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ este operatorul de rotire.

a) *factorul de nesimetrie zero de tensiune* k_U^0 se definește ca raportul dintre valoarea efectivă a componentei de secvență zero și valoarea efectivă a componentei de secvență pozitivă a tensiunii:

$$k_U^0 = \frac{U_0}{U_+} \cdot 100\% \quad (3.26)$$

În general componenta de secvență homopolară apare în rețelele de joasă tensiune, iar propagarea ei la nivele superioare de tensiune este împiedicată de conexiune delta a transformatoarelor.

b) *factorul de nesimetrie negativ de tensiune* k_U^- este definit ca raport între valoarea efectivă a componentei de secvență negativă și valoarea efectivă a componentei de secvență pozitivă a tensiunii:

$$k_U^- = \frac{U_-}{U_+} \cdot 100\% \quad (3.27)$$

Conform standardelor internaționale, factorul de nesimetrie negativ poate fi calculat cu ajutorul tensiunilor pe faze sau de linie după cum urmează:

- în [IEC61000-2-12]

$$k_U^- = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} - 2 \quad (3.28)$$

- în [IEC61000-4-30]

$$k_U^- = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100\% \quad \text{unde} \quad \beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2} \quad (3.29)$$

- în [IEC61000-2-1] și [IEC61000-4-27]

$$k_U^- = \frac{\Delta U_{max}}{\Delta U_{med}} \cdot 100\% \quad (3.30)$$

unde:

ΔU_{max} – abaterea maximă a tensiunii față de valoarea medie a tensiunii pe fază;

ΔU_{med} – tensiunea medie pe fază.

Pentru a putea determina dacă un punct din rețeaua electrică respectă nivelele de compatibilitate impuse de standarde, [IEC61000-4-30] propune următoarea metodă de măsurare.

Se determină valorile $k_{\bar{U}}$ pe un interval de zece perioade. Rezultatele obținute astfel, se mediază pe intervale caracteristice de timp egale cu 3 secunde (interval foarte scurt), 10 minute (interval scurt) și două ore (interval lung). Factorii de distorsiune mediați pe aceste intervale se determină astfel:

$$k_{\bar{U}_{-3s}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (K_{\bar{U}\%,k})^2}{N}} \quad (3.31)$$

$$k_{\bar{U}_{-10min}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (k_{\bar{U}_{-3s},k})^2}{M}} \quad (3.32)$$

$$k_{\bar{U}_{-2h}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^P (k_{\bar{U}_{-10min},k})^2}{P}} \quad (3.33)$$

unde:

$k_{\bar{U}_{-3s}}$ este valoarea factorului de nesimetrie pe un interval de 3 secunde;

$k_{\bar{U}_{-10min}}$ – valoarea factorului de nesimetrie pe un interval de 10 minute;

$k_{\bar{U}_{-2h}}$ – valoarea factorului de nesimetrie pe un interval de două ore;

$K_{\bar{U}\%,k}$ – valorile factorului de nesimetrie determinate pe intervale de 10 perioade, pentru N măsurători succesive;

M – este numărul de valori medii ale $k_{\bar{U}_{-3s}}$;

P – este numărul de valori medii ale $k_{\bar{U}_{-10min}}$.

Perioada de monitorizare minimă este de o zi. Acești factori determinați se compară cu nivele de compatibilitate stabilite în standarde.

În majoritatea standardelor internaționale valoarea factorului de nesimetrie este unanim dată pentru rețelele de distribuție 2%, cu precizarea la EN 50160 de realizare a acestei valori în 95% din intervalul de referință de o săptămână.

3.2.6. Monitorizarea calității energiei electrice

Monitorizarea calității energiei electrice își propune identificarea calității energiei electrice în una din următoarele situații:

- analiza calității energiei electrice de către furnizor, în punctele de delimitare cu sistemul ale consumatorilor ce produc perturbații;
- diagnosticarea calității energiei electrice la consumatorii care generează perturbații;
- verificarea condițiilor contractuale între furnizor și consumator.

Pentru realizarea monitorizării sunt necesare a adopta următoarele măsuri, măsuri grupate în Fig.3.6.

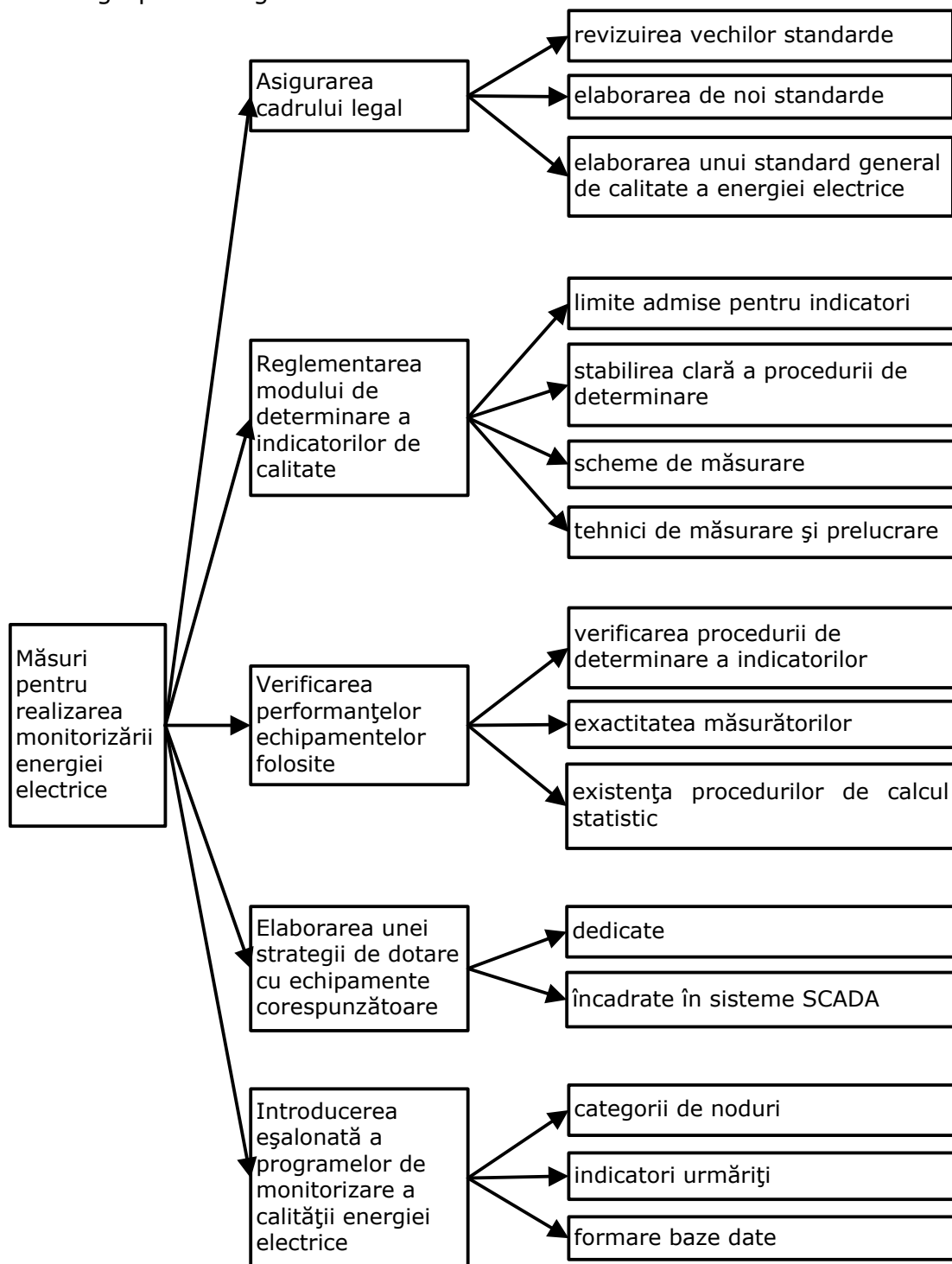


Fig.3.6. Măsuri pentru realizarea monitorizării energiei electrice.

3.3. Studiu de caz.

În continuare se va prezenta un studiu de caz pentru care se va aplica metodologia mai sus descrisă. Acest caz a fost selectat din rândul studiilor efectuate în domeniul calității energiei electrice care au fost concretizate în mai multe lucrări și contracte de cercetare [Chiosa2005a], [Chiosa2005b], [***2004a], [***2004c], [***2004d], [***2005].

3.3.1. Determinări experimentale. Măsurători

Elementul principal urmărit (monitorizat) a fost calitatea tensiunii prin indicatorii aferenți curbei tensiunii și curenților. Metoda de urmărire a acestor indicatori este prezentat în Fig.3.7.

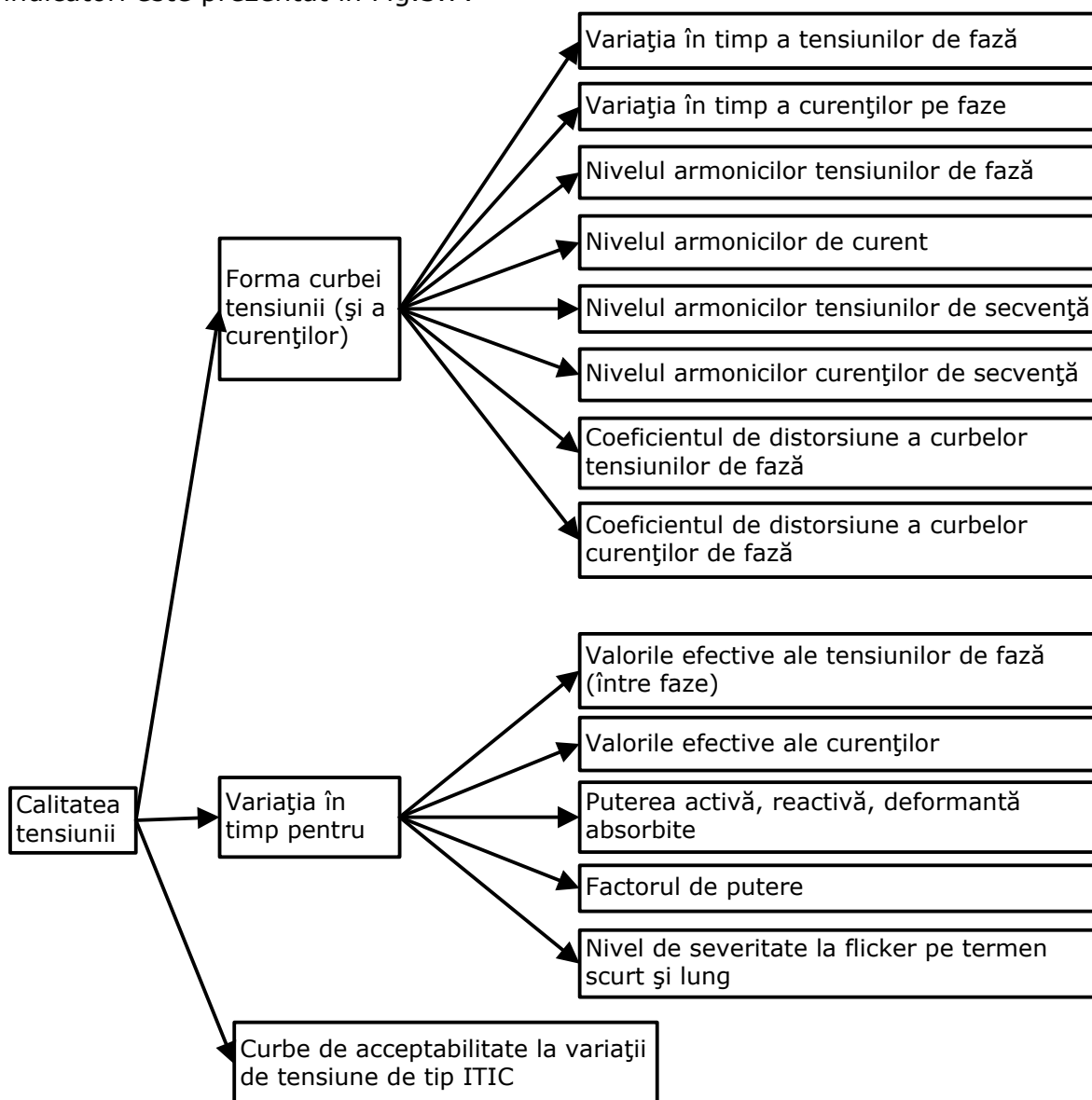


Fig.3.7. Metoda de urmărire a indicatorilor de calitate a tensiunii.

Măsurătorile s-au efectuat în rețeaua de medie tensiune (6kV) și joasă tensiune (0,4kV) a municipiului Reșița având drept scop stabilirea emisie de perturbații electromagnetice produse de cuptorul cu arc electric de la Combinatul Siderurgic Reșița.

Durata monitorizării a fost de o săptămână pentru fiecare nivel de tensiune, iar drept echipamente s-au folosit:

- Sistem NEXUS 1250 Power Quality Monitoring produs de firma Electro Industries / Gange Tech New York 2003 [***NEXUS2003];
- Sistem TRINET produs de firma TELECOM București, varianta 1997;
- Sistem de monitorizare cu placă de achiziție PCI-6023 (fabricația National Instruments Corporation) realizat în cadrul Universității POLITEHNICA din Timișoara, Catedra de Electroenergetică [***PCI-6023].

Monitorizarea s-a efectuat pe barele de 6kV ale transformatorului T1 din stația Bârzava și la bornele rețelei de 0,4kV alimentate de PT 4160.

3.3.2. Înregistrările curbelor de tensiune și de curent

Înregistrările curbelor de tensiune și de curent s-au efectuat în principal cu cele două echipamente: NEXUS și TRINET atât la nivelul de medie tensiune (NEXUS și TRINET) cât și la acela de joasă tensiune (NEXUS).

În Fig.3.8 se prezintă o captură dintr-un fișier înregistrat în prima zi, cu sistemul TRINET, în Stația Bârzava. În ANEXA 1 (Fig.A1.1; A1.2; A1.3) se prezintă complet, trei dintre fișierele înregistrate în prima și a doua zi.

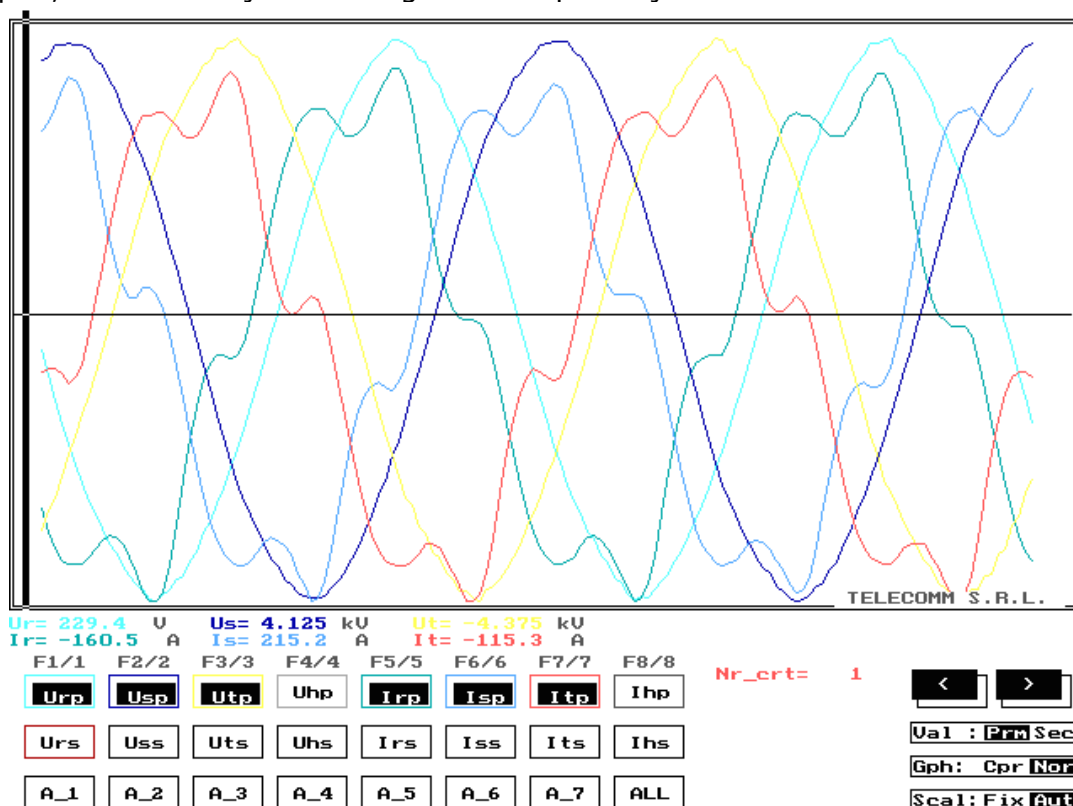


Fig.3.8. Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 fișier Bârzava.

Tot în ANEXA 1 (Fig.A1.4, A1.5, A1.6) sunt prezentate câteva dintre oscilograme înregistrate pe durata de o săptămână, efectuate cu sistemul NEXUS în Stația BÂRZAVA. Oscilogramele au fost extrase pe intervalul în care s-au produs variații rapide de tensiune. După cum se constată acestea sunt sub forma unor goluri de tensiune, care întrerup curbele de tensiune din variația lor firească. Două tensiuni scad pe durata golului la valori foarte apropiate de zero, iar a treia variază între valorile extreme: maximă și minimă. Ca durată a perturbației, aceasta afectează cel mult jumătate din perioada curbei de tensiune. Un alt element interesant pe partea de înaltă tensiune este faptul că, variația curentului urmărește foarte îndeaproape variația tensiunii fiind practic în fază cu aceasta. Acest lucru rezultă și din valorile factorului de putere cuprinse între $0,81 \div 0,89$, iar ca valoare medie $0,85$. Pe măsură ce procesul de topire devine mai intens (adică puterea activă absorbită crește), factorul de putere tinde către $0,9$.

În ceea ce privește forma tensiunii pe cele trei faze, ele sunt practic sinusoidale, având coeficienți de distorsiune THD care nu depășesc $1,5-2\%$ cu valori medii de $1,67\%$; mai mari pe fazele R și T și mai mici pe faza S.

Foarte interesant de urmărit sunt armonicile de rang 5. În acest sens se constată că ele nu depășesc nivelul $1,6\%$, atingând în cca. $2-3\%$ nivelul de $1,7-1,8\%$. Comparând evoluția nivelului armonicilor, cu aceea a puterilor activă și reactivă, se constată o slabă corelație cu puterea activă și mai bună cu aceea reactivă (ANEXA 1 - Fig.A1.7, A1.8, A1.9). Aceiași observație se poate face și referitor la factorul de distorsiune al tensiunii THD_U (ANEXA 1 - Fig.A1.9).

În ceea ce privește nivelul armonicilor de tensiune corespunzător armonicilor 7, 11, 13, acestea sunt simțitor sub valorile admise (nivelul de compatibilitate), iar evoluția lor în timpul corespunzător celor 24 ore sunt prezentate în Fig.A1.8., valorile medii statistice fiind de $\gamma_{7U} = 0,47\%$, $\gamma_{11U} = 0,22\%$, $\gamma_{13U} = 0,25\%$ și sunt atinse în condiții de 95% .

În ceea ce privește forma curbelor de curent, aceasta este foarte distorsionată, așa cum era de așteptat. Valorile lui δ_I (adică THD_I) sunt cuprinse între 13% și 27% , valorile medii fiind de cca 18% . Fazele R și T sunt mai deformate la un anumit moment apoi S și T; oricum nu se poate trage o concluzie generală.

De menționat că măsurătorile efectuate cu sistemul NEXUS au evidențiat în cursul celei de a doua zi, prezența unui nivel de armonici în curba tensiunii mai redus decât acelea semnalate de TRINET, rezultate prezentate în Tabelul 3.6.

Tabelul 3.6. Nivelul armonicilor înregistrate cu sistemul NEXUS în cursul celei de a doua zi.

Armonica k	Nivel $\gamma_{kU}\%$	$\gamma_{kU}^*\%$
3	2,60	0,64
5	4,00	0,95
7	2,30	0,59
9	2,50	0,40
11	2,60	0,23
13	2,70	0,26
15	2,00	0,12
17	1,90	0,80
19	1,40	0,10
21	1,35	0,17
23	1,25	0,15
25	0,85	0,80

De remarcat că aceste valori au fost realizate pe durata elaborării șarjei de către cuptorul electric. În aceste condiții nivelul armonicilor 9, 15, 21 este depășit. Alături de „*” sunt menționate și valorile realizate în afara regimului de topire.

Se constată că în cazul din urmă, nivelul emisiilor este mult mai redus, iar nivelul planificat este îndeplinit. Coeficientul de distorsiune al tensiunii în prima situație este 7,87% (față de 8%), iar în a doua situație 1,815%.

Oricum trebuie menționat că pe durata amorsării arcului electric emisia de perturbații armonice se menține apropiată de limita de emisie.

În încheierea acestui paragraf în Tabelul 3.7 sunt înscrise valorile coeficienților de corelație dintre indicatorii regimului nesinusoidal și respectiv puterea activă și reactivă consumată.

Tabelul 3.7. Valorile coeficienților de corelație.

Corelație	(δ_V, δ_I)	(δ_V, P)	(δ_V, Q)	(δ_I, P)	(δ_I, Q)
r	-0,667	0,61	0,158	-0,859	-0,538

(γ_{V5}, P)	(γ_{V7}, P)	(γ_{V11}, P)	(γ_{V13}, P)	(γ_{V5}, Q)	(γ_{V7}, Q)	(γ_{V11}, Q)	(γ_{V13}, Q)
0,776	-0,16	-0,42	-0,06	0,215	-0,293	-0,17	0,188

Din cele înscrise în tabel a rezultat existența unei corelații foarte slabe între nivelul emisiilor armonice și puterile activă și reactivă absorbite.

În următoarea săptămână s-au efectuat măsurători pe barele de 0,4kV ale postului de transformare PT 4160. În intervalul care a cuprins apariția unui gol de tensiune, o fereastră de 6 perioade se prezintă ca în ANEXA 1 (Fig.A1.10), iar o extensie pe durata producerii perturbației (golului de tensiune), din ultima zi ca în ANEXA 1 (Fig.A1.11). În Fig.A1.11 alături de porțiunea perturbației formei tensiunii de fază, se prezintă spectrul armonicilor.

Pe durata perturbației spectrul armonicilor de tensiune prezentat în ANEXA 1 (Fig.A1.12) este foarte încărcat, situație de așteptat, dacă se are în vedere gravitatea perturbației. În schimb în afara perturbației spectrul este mult mai liniștit după cum se observă din Tabelul 3.8.

Tabelul 3.8. Spectrul armonic în afara perioadei de perturbație.

Armonica	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Nivel [%]	3,9	2,3	1,0	0,9	0,8	0,4	0,4	0,55	0,2	0,15

Valorile înscrise în Tabelul 3.8 sunt evident inferioare celor corespunzătoare nivelelor de compatibilitate și chiar și celor planificate. Făcând o comparație orientativă (întrucât măsurătorilor nu au fost efectuate simultan), prezentată în Tabelul 3.9, se constată existența unor amplificări a nivelului armonicilor inferioare, fapt justificat prin existența unor elemente armonice cu caracter capacitiv la nivelul de joasă tensiune și probabil chiar a unor fenomene de rezonanță armonică.

Tabelul 3.9. Raportul dintre armonicile de joasă și medie tensiune.

Armonica	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
Raport armonici jt/mt	6,1	2,4	1,7	2,25	4	1,54	3,33	0,68	2,0	0,88	0,07

O altă explicație constă în faptul că sursele principale de armonici nu sunt la nivelul de medie tensiune, ci la joasă tensiune (tehnică de calcul, iluminat

fluorescent etc.), iar prezența unui consumator deformant la nivelul de medie tensiune asigură distorsiuni în plus.

În ceea ce privește coeficientul de distorsiune a curbei tensiunii, acesta are valoarea de $\delta_U = 4,86\%$ și este evident inferior valorii admise de 8%.

În ceea ce privește nivelul armonicilor tensiunilor de secvență, aceste se încadrează între valorile tensiunilor de fază, valoare medie corespunzând secvenței armonicii: secvența + pentru armonicile $6k+1$ (7, 13, 19, 25), secvența - pentru armonicile $6k-1$ (5, 11, 17, 23) și 0 pentru armonicile multiplu de $3k$ (3, 9, 15, 21).

Referitor la spectrul armonicilor de curent, acesta este foarte bogat, după cum era de așteptat predomină armonicile: 5 (17-20%), 7 (4-5,8%), restul armonicilor au nivel sub 1%. Pe durata amorțirii arcului electric nivelul armonicilor de curent crește simțitor; astfel: armonica 5 ajunge până la 25% iar armonica 7 până la 10%.

3.3.3. Gradul de nesimetrie al sistemului de tensiuni trifazate

Pentru estimarea gradului de nesimetrie al sistemului trifazat de tensiuni, sistemele de monitorizare folosite au calculat coeficientul de nesimetrie negativă k_{n-} (sau de disimetrie) și cel de nesimetrie zero k_{n0} (sau de asimetrie), precum și rapoartele de nesimetrie γ_{nS} și raportul diferențial de nesimetrie γ_{nSd} . Menționăm și aici că indicatorul normat este coeficientul de nesimetrie negativă, iar pentru nivelul de joasă și medie tensiune valoarea lor normată este de 2%.

Valorile măsurate pentru coeficientul k_{n-} sunt de 1,6-1,8%, iar valoarea medie pătratică de 1,72% inferioară valorii corespunzătoare pragului de compatibilitate 2%.

În sensul celor afirmate în Fig.3.9 se prezintă variația coeficienților k_{nV-} și k_{nV0} pentru tensiunile aflate la nivelul de 6kV, în prima zi de monitorizare, pe durata a 2 ore ($18^{00} - 20^{00}$), iar în Fig.3.10 variația aceluiași coeficienți de nesimetrie, dar pentru curenți. În același sens în ANEXA 1 (Fig.A1.13) se prezintă variația tensiunii (valoare efectivă) pe cele trei faze: a, b, c.

Se constată că variația valorilor efective a tensiunii este cuprinsă în intervalul de 3,52-3,725kV, adică corespunde unei abateri de 5,95%. De asemenea, valorile coeficienților de nesimetrie negativă nu depășesc valoarea de 2%.

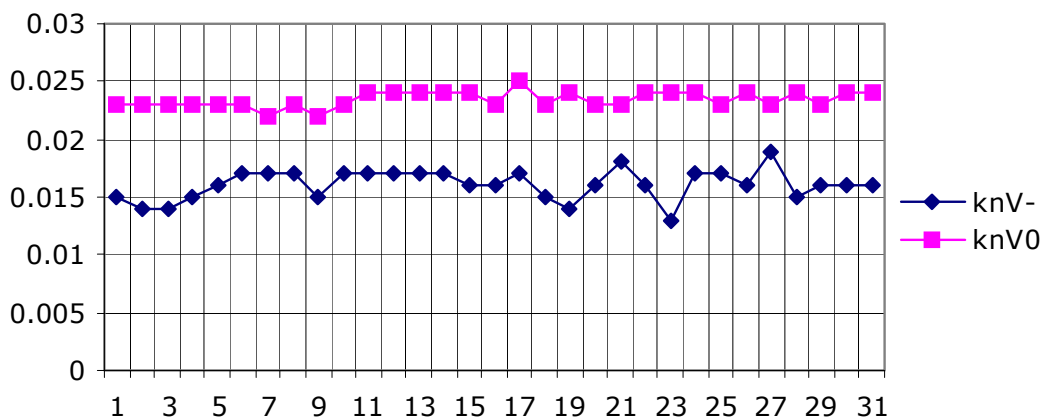


Fig.3.9. Factorul de nesimetrie pentru tensiune.

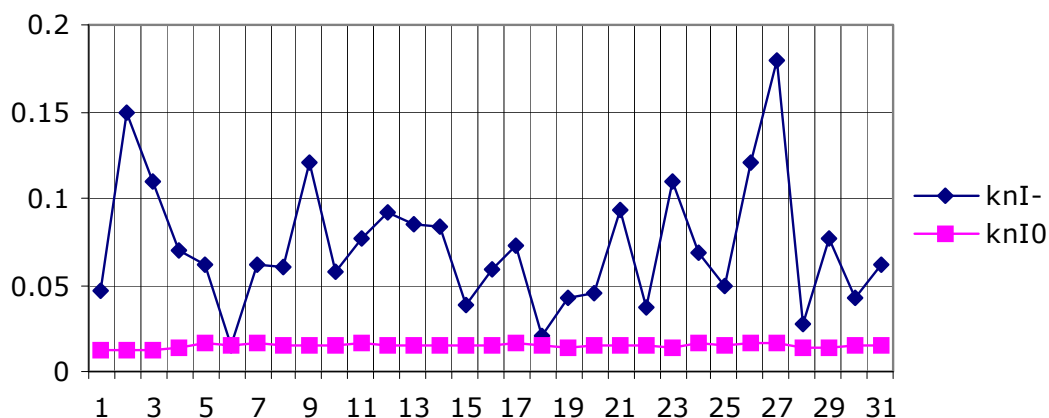


Fig.3.10. Factorul de nesimetrie pentru curent.

Referitor la gradul de nesimetrie al tensiunilor de fază la nivelul de joasă tensiune, în Fig.A1.14 se prezintă variația tensiunii pe cele trei faze în intervalul de 2 ore corespunzător mai sus menționat. Se constată că valorile efective ale tensiunilor de fază sunt cuprinse practic în intervalul 240-244V adică $-4,35\% \div +6,1\%$, adică valori cu totul admisibile față de cele admise $\pm 10\%$ conform standardelor naționale și a celor europene [EN50160].

3.3.4. Fenomenul de flicker

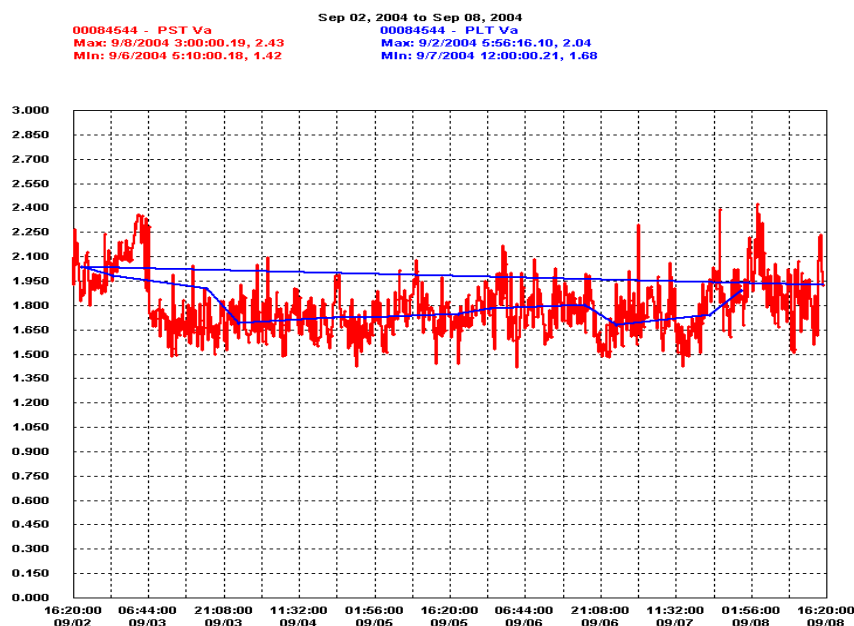
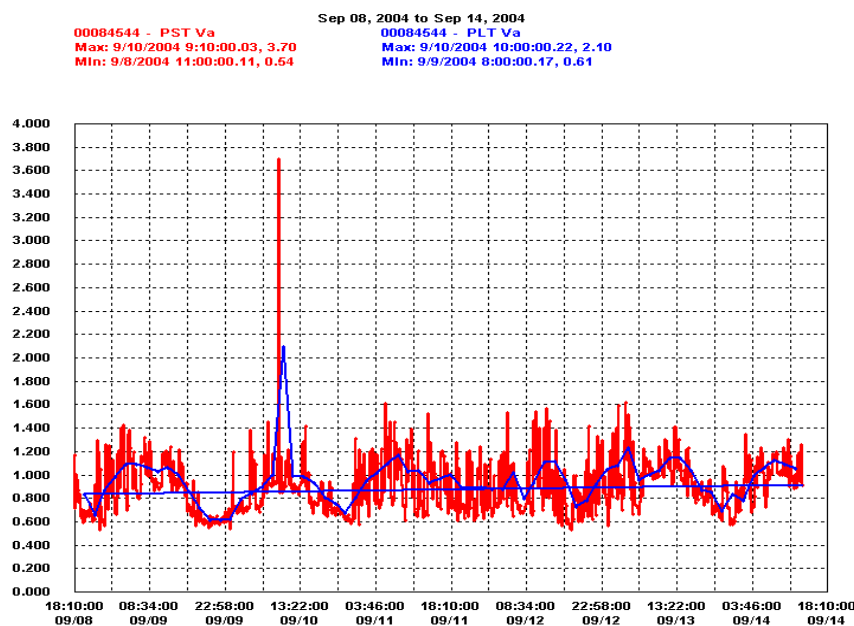
Pentru evaluarea nivelului de flicker, așa cum s-a mai menționat s-au calculat cei doi indicatori – severitatea pe termen scurt P_{st} și severitatea pe termen lung P_{lt} . Estimarea s-a efectuat automat apelând la sistemul NEXUS în care s-au setat coeficienții necesari calculului.

Determinările s-au realizat pe cele trei faze a, b, c la nivelul de 6kV (prima săptămână) și la nivelul de 0,4kV (a doua săptămână).

Variația celor doi indicatori se prezintă în Fig.3.11 și în ANEXA 1 (Fig.A1.15) pentru 6kV, respectiv în Fig.3.12 și în ANEXA 1 (Fig.A1.16) pentru nivelul de 0,4kV.

Din analiza valorilor celor 2 indicatori rezultă următoarele:

- pentru nivelul de 6kV valorile lui P_{st} sunt cuprinse între 1,4÷2,4 pentru faza a; între 1,5÷2,3 pentru faza b și între 1,65÷2,55 pentru faza c; valorile medii fiind practic la mijlocul acestor intervale. Comparativ cu nivelul de compatibilitate impus de normative $P_{st}=1$ se poate aprecia că nivelul existent este practic dublu, adică depășirea este de 100%. În ceea ce privește indicatorul P_{lt} valoarea acestuia variază într-un domeniu mult mai restrâns 1,95÷2 pentru faza a, 1,8÷1,95 pentru faza b; 2,1÷2,26 pentru faza c; valori care depășesc cu mult valoarea limitată de compatibilitate $P_{lt}=0,8$; adică depășiri de cca. 200÷250%;
- pentru nivelul de 0,4kV valorile lui P_{st} sunt cuprinse între 0,6÷1,4 pentru faza a; între 0,6÷1,4 pentru faza b și între 0,5÷1,2 pentru faza c; valorile medii fiind de circa 1, adică tocmai egală cu limita admisă. În ceea ce privește valorile lui P_{lt} acestea variază între 0,8÷0,9 pentru faza a, 0,76÷0,8 pentru faza b; 0,7÷0,72 pentru faza c, adică depășesc valoarea admisă de 0,8.

Fig.3.11. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza a, V_a nivel 6kV.Fig.3.12. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza a, V_a nivel 0,4kV.

În final se poate aprecia că emisia perturbatoare de flicker este depășită, mai pronunțat pentru nivelul de medie tensiune și mai puțin pentru cel de joasă tensiune.

3.3.5. Întreruperi și variații de tensiune

Pe durata măsurărilor nu au existat întreruperi în alimentare care să fie sesizate de echipamentele de măsurare. În ceea ce privește variațiile rapide de tensiune, echipamentul NEXUS ridică automat o curbă de acceptabilitate, care indică poziția punctelor de funcționare corespunzător unei anumite perioade. Astfel în

Fig.A1.17 și respectiv Fig.A1.18 sunt prezentate aceste curbe de acceptabilitate (de tip ITIC) pentru tensiunile de fază corespunzător barelor de 6kV și respectiv de 0,4kV. Se constată că variațiile tensiunilor de fază sunt cuprinse în intervalul $2 \cdot 10^{-2}s$ și $3 \cdot 10s$ iar ca mărime între 100-110%.

3.4. Concluzii

Aplicația din acest capitol și-a propus să analizeze emisia de perturbații electromagnetice produse de consumatorul perturbant.

În acest scop pe durata a două săptămâni, s-au efectuat măsurători în stația Bârzava la nivelul de 6kV (barele de 6kV ale transformatorului T1) și la bornele rețelei de 0,4kV alimentate de PT160.

Pentru efectuarea măsurătorilor s-au utilizat următoarele echipamente:

- Sistem NEXUS 1250 Power Quality Monitoring produs de firma Electro Industries / Gange Tech New York 2003;
- Sistem TRINET produs de firma TELECOM București, varianta 1997;
- Sistem de monitorizare cu placă de achiziție PCI-6023 (fabricație National Instruments Corporation) realizat în cadrul Universității POLITEHNICA din Timișoara, Catedra de Electroenergetică.

Mărimile care au fost monitorizate se referă la *calitatea tensiunii* în primul rând și apoi la aceea a curentului și a puterii. Această monitorizare s-a efectuat înregistrând forma curbelor tensiunii de fază și o tensiune între faze, iar apoi cu programe dedicate s-au calculat o serie de indicatori având-se în vedere normativele naționale de calitate în vigoare și prevederile normativelor europene referitoare la calitatea (caracteristicile) tensiunii furnizate de rețelele publice de distribuție – EN50160/1999 sau SREN 50160/2003.

Durata măsurătorilor pentru fiecare nivel de tensiune vizat a fost practic o săptămână, dar în lucrare sunt prezentate graficele de variație a unor indicatori și pe durate mai restrânse: 2 ore sau 10 minute, aceste durate considerându-se în conformitate cu normativele în vigoare.

Referitor la normativele care au fost luate în considerare la organizarea și prelucrarea rezultatelor, iar apoi la interpretarea lor, acestea au fost următoarele: [PE143/1994], [PE143/2001], [PE142/2001], [SREN50160].

Referitor la rezultatele măsurătorilor, se pot face următoarele comentarii și anume:

- Regimul nesinusoidal în curbele de tensiune este prezent atât la nivelul de medie, cât și la nivelul de joasă tensiune, dar limitele de planificare și chiar cele de compatibilitate nu sunt depășite, atât sub aspectul nivelului armonicilor de tensiune, cât și al valorii coeficientului de distorsiune a tensiunii δ_U (THD_U).

În plus trebuie remarcat că la nivelul de medie tensiune deși se află un consumator deformant ce dispune de o putere semnificativă, nivelul de distorsiune al curbelor de tensiune este mai puțin pronunțat decât la joasă tensiune. Cu alte cuvinte sursele de perturbații – consumatori neliniari sunt dispuși la nivelul de joasă tensiune, iar în condițiile în care tensiunea provenită din rețeaua de medie prezintă unele distorsiuni, acestea sunt accentuate de consumatorii aflați la nivelul de joasă tensiune. Cu toate acestea situația nu este alarmantă, armonica cea mai prezentă, a 5-a nu prezintă un nivel mai mare de 2%, iar în majoritatea țărilor din Comunitatea Europeană depășește 2,5% și chiar 3% [EURELECTRIC2002].

- Regimul nesimetric al sistemului trifazat de tensiuni de alimentare se situează în limitele de compatibilitate. În acest sens atât la nivel de 6kV cât și la nivel de 0,4kV factorul de nesimetrie negativă nu depășește 2% în 95% din situațiile monitorizate atât pe durata unei săptămâni, cât și pe intervale reduse de 2 ore și respectiv 10 minute. Dacă ne referim la mărimile nenormate, se constată că factorul de nesimetrie zero depășește valoarea de 2%, iar tensiunea de secvență zero atinge valori de 80kV (adică circa 1,33%).
- Fluctuațiile de tensiune și respectiv fenomenul de flicker este prezent în limite inadmisibile atât la nivelul de 6kV cât și la nivelul de 0,4kV; mai pronunțate la nivelul de 6kV și mai puțin pronunțate la nivelul de 0,4kV, fapt absolut explicabil dacă se are în vedere că sursa de flicker este cuptorul electric ce se alimentează de al rețeaua de 6kV. Cei doi indicatori de severitate pe termen scurt și pe termen lung, sunt depășiți sensibil față de valorile de compatibilitate în mai mult de 50% în cazul tensiunii de 6kV și 30% în cazul tensiunii de 0,4kV. Oricum aici sunt probleme de calitate sensibile care nu sunt asigurate. Cauza este fără îndoială consumatorul deformant – cuptorul electric de la C.S. Reșița.
- Variațiile de tensiune rapide și lente au fost monitorizate cu ajutorul echipamentului NEXUS, care este un echipament dedicat în acest sens. Curbele de acceptabilitate ridicate pentru tensiunile de fază, atât la nivelul de medie, cât și joasă tensiune atestă că în toate cazurile (100%) situațiile sunt acceptabile, iar variațiile de scurtă durată (instantanee, momentane și temporare) n-au depășit ca amplitudine 10% iar ca durată 30 de secunde. Totuși trebuie remarcat că la nivelul de 6kV, majoritatea variațiilor produse (cca. 90%) sunt situate la limita superioară a limitei de compatibilitate.

Din cele prezentate rezultă că în etapele următoare este necesar a efectua monitorizarea consumatorului în punctul de cuplare la rețea (PCC), iar apoi găsiți o altă cale de alimentare, care poate asigura o atenuare a perturbațiilor emise.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale din acest capitol:

- prezentarea într-o manieră mai structurată a prevederilor standardului EN50610-1999, privind problemele generale legate de perturbațiile electromagnetice, cum ar fi definirea acestora, clasificarea lor, definirea nivelurilor de compatibilitate electromagnetică;
- realizarea unui algoritm de analiză a unei sarcinii perturbatoare;
- structurarea problemelor legate de calitatea tensiunii furnizate de către distribuitorul de energie electrice, precum și prezentarea principalilor indicatori care caracterizează calitatea tensiunii electrice furnizate;
- realizarea unui studiu de caz privind calitatea tensiunii electrice furnizate municipiului Reșița, care s-a realizat pe barele de medie tensiune din stația de ÎT/MT Bârzava, precum și la bornele de joasă tensiune a postului de transformare PT160;
- monitorizarea calității tensiunii cu trei sisteme de monitorizare diferite (*NEXUS 1250* de producție americană, *TRINET* de producție românească și *Sistem de monitorizare cu placă de achiziție PCI-6023* realizat cu placă de achiziție de producție National Instruments, de către colectivul catedrei de Electroenergetică din Timișoara sub conducerea prof.dr.ing. Adrian BUTA), care a avut drept scop găsirea diferențelor de realizare a normelor de calitate a tensiunii electrice, care apar datorită utilizării diferitelor standarde pentru realizarea sistemelor de monitorizare.

4. CARACTERIZAREA GOLURILOR DE TENSIUNE

În acest capitol se tratează mai amănunțit problema golurilor de tensiune. În prima parte se prezintă sintetic prevederile principalelor standarde din domeniul golurilor de tensiune. În continuare se prezintă două metode de clasificare și caracterizare a golurilor de tensiune, precizându-se avantajele și dezavantajele fiecărei metode. Ulterior s-au prezentat mai mulți algoritmi dezvoltați în literatura de specialitate care au drept scop identificarea caracteristicilor golurilor de tensiune înregistrate în rețeaua electrică de transport și distribuție a energiei electrice. Aceștia au fost testați pe mai multe înregistrări de goluri de tensiune realizate în diferite puncte ale rețelei electrice. În finalul capitolului se prezintă un nou algoritm, original, pentru determinarea caracteristicilor golurilor de tensiune obținute din înregistrări ale curbelor de tensiune, iar validarea acestuia se face prin compararea rezultatelor cu cele obținute cu ceilalți algoritmi prezentați în lucrare.

4.1. Parametrii caracteristici

În literatura de specialitate au existat o multitudine pe propuneri, pentru stabilirea parametrilor care caracterizează un gol de tensiune. Majoritatea cercetătorilor au ajuns la concluzia că principalii parametri pentru un gol de tensiune, sunt amplitudinea și durata acestuia. O altă categorie de studii evidențiază faptul că un gol de tensiune trebuie să fie caracterizat și de saltul unghiului de fază (phase angle jump). În acest subcapitol vor fi analizați acești parametri.

4.1.1. Amplitudinea și durata golului de tensiune

Amplitudinea și durata sunt cele mai importante caracteristici ale golurilor de tensiune.

Amplitudinea golului de tensiune se definește ca fiind valoarea minimă a tensiunii efective determinată pe durata golului de tensiune. În unele țări amplitudinea se definește ca fiind pierderea maximă de tensiune din valoarea efectivă nominală. Din acest motiv este foarte important de știut la care din cele două variante de definiție ne referim. În această lucrare s-a ales ca sens pentru amplitudine, prima definiție.

Deoarece în definirea amplitudinii golului de tensiune se folosește valoarea efectivă a tensiunii, în relația (4.1) se prezintă modul de obținere a valorii efective din valori momentane, în cazul înregistrării curbei de tensiune prin discretizare.

$$U_{ef}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k u_i^2} \quad (4.1)$$

Unde:

N este numărul de înregistrări pe durata unei perioade;

u_i – valoarea momentană a tensiunii în momentul i ;

k – este momentul de timp pentru care se dorește calcularea valorii efective.

Din relația (4.1) se observă că valoarea efectivă într-un anumit moment de timp se calculează cu ajutorul ultimelor N valorilor momentane obținute. Totodată se observă că valoarea efectivă se calculează pe durata unei perioade fundamentale (în cazul frecvenței de 50Hz durata este de 20ms).

În literatura de specialitate se prezintă încă o metodă de calcul a valorii efective, care presupune luarea în considerare a valorilor momentane înregistrate pe o durată de jumătate de perioadă, cum rezultă din relația (4.2).

$$U_{ef(1/2)}(k) = \sqrt{\frac{2}{N} \cdot \sum_{i=k-(N/2)+1}^k u_i^2} \quad (4.2)$$

Acest algoritm este mai sensibil la schimbările apărute în curba tensiunii. Practic el are avantajul că detectează mai repede începutul și sfârșitul golului de tensiune (Fig. 4.1).

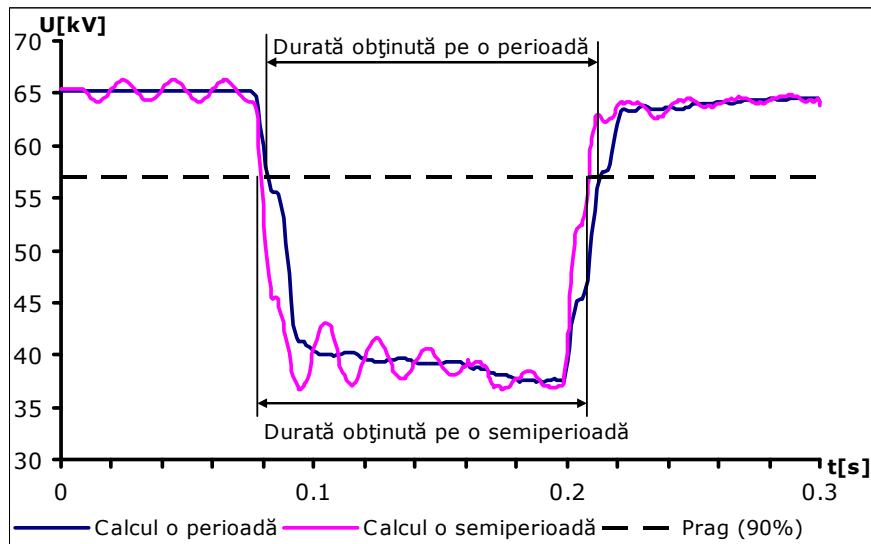


Fig. 4.1. Valoarea efectivă a unui gol de tensiune obținută conform celor două metode.

În [Kagan2000] se demonstrează că diferența dintre duratele determinate cu cele două relații prezentate, pentru același gol de tensiune, este atât de mică încât nu afectează estimarea indicilor golului de tensiune.

O altă metodă de determinarea a caracteristicilor golului de tensiune s-a obținut prin descompunerea în serie Fourier a curbei înregistrate și extragerea valorilor corespunzătoare frecvenței fundamentale. Dacă se aplică relația (4.1) curbei tensiunii obținute pentru frecvența fundamentală, se obține valoarea efectivă a tensiunii pe fundamentală. Din [Ohrstrom2003] rezultă că pentru nivele acceptabile ale perturbațiilor armonice (pentru un THD=8%, rezultă o eroare a valorii efective definită pe fundamentală față de cea reală de 0,3%), se poate utiliza cu suficientă precizie curba valorii efective a tensiunii pe fundamentală.

Durata golului de tensiune reprezintă perioada de timp pentru care valoarea efectivă a tensiunii este mai mică decât valoarea de prag.

Duratele golurilor de tensiune sunt determinate de performanțele echipamentelor de protecție, automatizări și comutație care fac posibilă revenirea tensiunii normale. În Tabelul 4.1 se prezintă timpii uzuali ai protecțiilor din rețelele SEN de 110 kV și 220 kV [Buta2001].

Tabelul 4.1. Timpii uzuali ai protecțiilor din SEN.

Un [kV]	Tipul protecției	Treapta	Timpul protecției [s]	Tipul de RAR	Timpul de RAR [s]
110	de distanță	I	0,2	mono și trifazat	1-2
		II	0,5 – 1	mono și trifazat	1-2
		III	2,0 – 2,5	mono și trifazat	1-2
		IV	3,5	-	-
	homopolară	I	0,1 – 0,4	trifazat	1-2
		II	2,0 – 2,5	trifazat	1-2
220	de distanță	I	0,1	monofazat	0,8
		II	0,4 – 0,8	monofazat	0,8
		III	0,8 – 2,0	-	-
		IV	2,0 – 3,5	-	-
	homopolară	I	0,1 – 0,4	-	-
		II	2,0	-	-

Echipamentele moderne utilizate în rețelele electrice permit o durată minimă de eliminare a defectelor de 0,08 s (o perioadă pentru relele și trei perioade pentru întreruptoare).

Ca și tensiunile reziduale, durata golurilor de tensiune are o mare influență asupra comportării receptoarelor sensibile la astfel de perturbații. Determinarea duratelor probabile ale golurilor de tensiune se poate face după cunoașterea timpilor de lucru ai diferitelor echipamente. La ora actuală, cunoașterea cu o precizie mai mare a duratei unui gol de tensiune este posibilă cu ajutorul echipamentelor moderne de achiziții de date.

Acești doi parametri (amplitudinea și durata) au fost îndelung dezbătuți, iar în Tabelul 4.2 se prezintă prevederile câtorva standarde internaționale, în ceea ce privește amplitudinile și duratele pentru care o scădere a tensiunii se consideră gol de tensiune [Baggini2008].

Tabelul 4.2. Definierea amplitudinii și duratei golului de tensiune în diferite standarde.

Standard	Amplitudine	Durata minimă	Durăță maximă
IEC 1000-2-1	10–100% din U_N	0.5 din perioadă	Câteva secunde
IEC 1000-2-2	10–100% din U_N	10 ms	3 s
IEC 1000-2-5	10–99% din U_N	10 ms	Câteva secunde
IEC 61000-2-12	10–99% din U_N	10 ms	3 s
EN 61000-4-11	10–95% din U_N	0.5 din perioadă	Câteva secunde
IEC 1000-6-1	10–95% din U_N		
IEC 1000-6-2	10–95% din U_N		
EN 50160	10–99% din U_N	10 ms	1 min
UNIPEDA	10–99% din U_N		
UIE	10–99% din U_N	10 ms	1 min
IEC 61000-4-30	Toate pragurile pot fi considerate în funcție de problema tratată		
IEEE Std. 1159-1995	10–90%	0.5 din perioadă	1 min
CENELEC	10–90%	10 ms	1 min
EPRI	< 95%	1 perioadă	1 min
Brazilian	10–90%	1 perioadă	1 min

Cunoașterea valorilor parametrilor caracteristici ai golurilor de tensiune este utilă pentru a determina, atât pentru instalațiile existente, cât și pentru cele nou

proiectate, cele mai bune soluții din punct de vedere tehnico-economic, pentru a micșora atât numărul cauzelor, cât și efectele golurilor de tensiune.

Caracteristicile golurilor de tensiune depind de condițiile climaterice locale și pot evolua în timp, pe de o parte datorită naturii aleatoare a cauzelor care le produc și pe de altă parte datorită modificării structurii rețelei furnizorului și/sau a utilizatorului. Este practic imposibil de a furniza informații concrete asupra golurilor de tensiune ce se produc în instalația interioară a unui utilizator, fiecare caz fiind un caz particular. Dimpotrivă, în rețeaua de distribuție a furnizorului au fost efectuate măsurători, au fost elaborate metode de predeterminare bazate pe funcționarea instalațiilor RAR, dar și bazate pe statistici ale defectelor. Rezultatele acestora au furnizat estimări ale caracteristicilor golurilor de tensiune, care au permis conturarea câtorva concluzii [Buta2001]:

- aproximativ 85 % din totalul golurilor de tensiune dintr-o rețea de medie tensiune au o durată mai mică de 0,4s;
- aproximativ 50 % dintre aceste goluri au o amplitudine inferioară valorii de $0,25 \cdot U_n$;
- numărul mediu (lunar sau anual) de goluri de tensiune dintr-o rețea nu poate fi determinat decât local și poate fi anticipat suficient de corect, utilizând statisticile de funcționare ale protecțiilor.

4.1.2. Saltul unghiului de fază

Majoritatea golurilor de tensiune, produse de scurtcircuitul din sistem, conduc și la o modificare instantanee a unghiurilor fazelor afectate, fenomen denumit *saltul unghiului de fază*.

În Fig.4.2. se prezintă schema monofilară a unei rețele electrice, raportate la un punct comun de cuplare (PCC). Impedanțele din schemă pot fi scrise conform relației (4.3).

$$\begin{aligned} \underline{Z}_s &= R_s + jX_s \\ \underline{Z}_f &= R_f + jX_f \end{aligned} \quad (4.3)$$

unde cu indicele s s-au notat impedența echivalentă a sursei văzută în PCC, și cu f s-a notat impedența echivalentă de la locul defectului până la PCC.

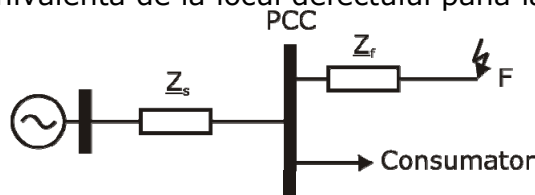


Fig. 4.2. Schemă pentru analiză a influenței scurtcircuitelor asupra golurilor de tensiune.

Din Fig.4.2., saltul unghiului de fază se poate determina cu relația (4.4).

$$\Delta\theta = a \tan\left(\frac{X_f}{R_f}\right) - a \tan\left(\frac{X_s + X_f}{R_s + R_f}\right) \quad (4.4)$$

Din relația 4.4 se observă că dacă raportul X/R al sursei este egal cu cel al rețelei de la PCC până la locul de defect, atunci valoarea saltului unghiului de fază este nulă. În [Bollen2000a], se arată că saltul unghiului de fază este mai pronunțat în situațiile în care defectele apar în cablurile electrice.

În situația în care se dorește obținerea saltului unghiului de fază din valorile momentane ale tensiunilor înregistrate cu un aparat de monitorizare, se determină

expresia complexă a tensiunii pe fundamentală pe durata golului de tensiune, aplicând STFT (Short-Time Fourier Transform), de unde se extrage amplitudinea și unghiul pentru fiecare moment de timp. Acestea se raportează la tensiunea pe fundamentală în regim anteperturbație exprimată sub formă complexă.

$$\Delta\theta(t) = \arg\left(\frac{\underline{U}(t)}{\underline{U}_0 \cdot e^{j\omega t}}\right) \quad (4.5)$$

unde:

$\underline{U}(t)$ – este tensiunea complexă pe fundamentală în momentul t ;

\underline{U}_0 – tensiunea complexă pe fundamentală din regim anteperturbație, la $t=0$;

t – momentul în care se calculează saltul unghiului de fază (acesta depinde de frecvența de eșantionarea a semnalului);

ω – pulsația corespunzătoare frecvenței fundamentale.

4.2. Clasificarea goluri de tensiune în sistemele trifazate

În urma analizei variațiilor de tensiune din rețelele electrice s-a constatat că golurile de tensiune pot afecta una sau mai multe faze ale rețelei, în mod simetric sau nesimetric. În cazul în care sunt afectate mai multe faze, acestea pot să aibă caracteristici diferite din punct de vedere al amplitudinii, al frecvenței și al duratei golului de tensiune.

În literatura de specialitate s-au realizat o multitudine de studii privind clasificarea și caracterizarea golurilor de tensiune [Bollen1997], [Yalcinkaya1998], [Zhang2000], [Bollen2003a], [Bollen2003c], [Mora2003a], [Mora2003b], [Martinez2004], [Didden2005], [Djokic2005a], [Djokic2005b], [Ignatova2005], [Axelberg2007], [Leborgne2006a], [Leborgne2006b], [Yebra2007], [Madrigal2007], [Ignatova2009]. În aceste studii au fost propuse multiple moduri de clasificare a golurilor de tensiune dintre care s-au detașat două: [Martinez2004] și [Bollen2003c]. În [Martinez2004] se propune ca un gol de tensiune într-o rețea trifazată, să fie tratat individual pe fiecare fază, adică pentru fiecare fază în parte se determină amplitudinea și durata golului de tensiune.

Cel mai utilizat principiu este considerarea golurilor de tensiune trifazate ca și un singur eveniment. În acest scop a fost necesară găsirea modului de considerare a amplitudinii și duratei golului de tensiune. În [Bollen2003c] se propune ca amplitudinea golului de tensiune trifazat să fie cea mai mică valoare efectivă înregistrată, iar durata golului de tensiune să fie cea mai lungă durată înregistrată pe una dintre cele trei faze. Pentru această metodă se observă următoarele:

- un eveniment care afectează doar o fază, este considerat la fel de sever ca și un eveniment care afectează toate cele trei faze;
- nu există o relație între tensiunile de fază și cele de linie;
- nu se poate analiza cauza golului de tensiune.

Tot în [Bollen2003c] se propun două metode de clasificare a golurilor de tensiune. Aceste metode au fost denumite „Clasificarea ABC” și „Clasificarea după componentele simetrice”. Ca și o observație a dezvoltării celor două metode, autorii au argumentat că prima clasificare (Clasificarea ABC), s-a realizat pornind de la modelarea simplistă a rețelei electrice, ea fiind mult mai ușor de utilizat pentru analiza diferitelor probleme și efecte pe care le implică golurile de tensiune.

4.2.1. Clasificarea ABC

Într-o fază inițială, în 1997 în lucrarea sa [Bollen1997], Bollen a propus clasificarea golurilor de tensiune în patru tipuri (A, B, C, D). Lucrarea se finaliza cu următoarele concluzii:

- golurile trifazate simetrice sunt de tipul A;
- golurile bifazate sunt de tipul C dacă conexiunea consumatorului este stea sau de tipul D dacă conexiunea consumatorului este delta;
- golurile monofazate sunt de tipul B dacă conexiunea consumatorului este stea sau de tipul C dacă conexiunea consumatorului este delta.

Se constată că tipurile de goluri de tensiune precizate mai sus corespund scurtcircuitelor 3F (tipul A), 2F (tipurile C și D) și FN (tipurile B și C). Deoarece această clasificare nu cuprindea toate tipurile posibile de goluri, în mod special golurile generate de scurtcircuite 2FN, clasificarea ABC a fost extinsă cu încă trei tipuri.

Noua clasificare ABC propune șapte tipuri de goluri de tensiune [Bollen2000a]. În Tabelul 4.3 sunt prezentate valorile complexe ale tensiunilor pe faze și diagrama fazorială a acestora pentru fiecare tip de gol.

S-a notat cu U tensiunea efectivă pe faza R din regimul ante-perturbație și cu h amplitudinea golului de tensiune în u.r. Pentru reprezentarea tipurilor de goluri de tensiune din Tabelul 4.3, s-a ales faza R ca și fază de referință. Prin urmare se pot obține încă două seturi de reprezentări, pornind ca și referință de la tensiunile efective pe fazele S sau T.

Pentru a se putea analiza cele șapte tipuri de goluri de tensiune se pornește de la Fig.4.2.

Dacă în punctul F apare un scurtcircuit trifazat sau trifazat cu punere la pământ, atunci în PCC apare un gol de tensiune trifazat simetric, caracterizat de o scădere identică a tensiunii pe toate cele trei fazele. Acest tip de gol de tensiune a fost notat în Clasificare ABC cu litera A.

Dacă în punctul F apare un scurtcircuit monofazat, atunci în PCC rezultă o scădere a tensiunii pe faza afectată. Pe fazele sănătoase tensiunea poate scădea, crește sau să rămână la valoarea ante-perturbație. Dacă tensiunea pe fazele sănătoase rămâne neschimbată atunci spunem că s-a obținut un gol de tip B.

Un defect bifazat în punctul F va conduce la o scădere a tensiunilor pe fazele afectate. În același timp apare o modificare bruscă a defazajelor fazelor defecte. Se observă că defazajele celor două faze defecte se modifică cu aceeași valoare, dar de semne contrare. În această situație se obține un gol de tensiune de tip C.

Golul de tensiune de tip D este caracterizat de o scădere mai mare a tensiunii pe una dintre faze și o scădere mai redusă a tensiunii pe celelalte două faze. Acest tip de gol de tensiune poate apărea datorită unui scurtcircuit monofazat la care tensiunile pe fazele sănătoase scad față de valoarea ante-perturbație. Se observă că defazajele celor două faze sănătoase se modifică cu aceeași valoare, dar de semne contrare.

Golul de tensiune de tip E, apare datorită unui scurtcircuit bifazat cu punere la pământ. În această situație tensiunile pe fazele afectate scad la valoarea golului de tensiune, fără a apare un salt în defazajul lor. Tensiunea pe faza sănătoasă rămâne la valoarea ante-perturbație.

Tipul F al golurilor de tensiune, apare la bornele unui transformator cu conexiune Dy, dacă la cealaltă pereche de borne avem un gol de tensiune de tip E. Tipul F este asemănător ca și comportare cu tipul D, diferența dintre cele două este dată de scăderea mai pronunțată a tensiunilor pe fazele afectate în cazul tipului F.

Tabelul 4.3. Clasificarea golurilor de tensiune conform clasificării ABC.

Tipul golului	Reprezentare fazorială	Tipul Scurtcircuitului	Calculul tensiunilor de fază
A		Scurtcircuit 3F	$\underline{U}_R = hU$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}hU - j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}hU + j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$
B		Scurtcircuit FN	$\underline{U}_R = hU$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}U$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$
C		Scurtcircuit 2F	$\underline{U}_R = U$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$
D		Scurtcircuit FN	$\underline{U}_R = hU$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}hU - j\frac{\sqrt{3}}{2}U$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}hU + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$
E		Scurtcircuit 2FN	$\underline{U}_R = U$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}hU - j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}hU + j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$
F		Scurtcircuit 2FN	$\underline{U}_R = hU$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{2}hU - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)U$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{2}hU + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)U$
G		Scurtcircuit 2FN	$\underline{U}_R = \frac{1}{3}(2+h)U$ $\underline{U}_S = -\frac{1}{6}(2+h)U - j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$ $\underline{U}_T = -\frac{1}{6}(2+h)U + j\frac{\sqrt{3}}{2}hU$

Dacă în serie cu primul transformator, mai există un transformator tot cu conexiune Dy, la bornele acestuia va apărea un gol de tensiune de tip G. Acest tip de gol de tensiune este asemănător cu cel de tip E, diferența fiind că apare o scădere de tensiunea și pe faza neafectată.

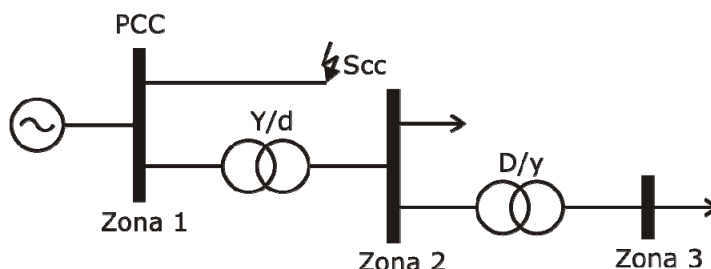


Fig.4.3. Schemă unei rețele electrice de distribuție pentru analiza propagării golului de tensiune.

Un rol important pentru care a fost creată această clasificare este acela de analiză ușoară a propagării golului de tensiune în rețeaua electrică. Propagarea celor șapte tipuri de goluri de tensiune prin transformatoare (Fig.4.3) este prezentată în Tabelul 4.4.

Tabelul 4.4. Goluri și nivele de tensiune diferite datorate diferitelor tipuri de defecte.

Tipul scurtcircuitului	Zona 1	Zona 2	Zona 3
3F sau 3FN	A	A	A
2FN	E	F	G
2F	C	D	C
FN	B	C	D

Metoda a fost dezvoltată pentru a facilita predicția probabilistică a golurilor de tensiune și instituie posibilitatea calculării frecvenței de apariție a diferitelor tipuri de goluri; respectiv prezintă o posibilitate de testare a comportamentului echipamentelor, la efectele golurilor de tensiune. Această clasificare face posibilă generarea unor goluri dintre cele șapte tipuri ce pot să apară la terminalele echipamentelor trifazate, reprezentând totodată bazele standardului IEC 61000-4-11 [IEC61000-4-11].

Metoda prezintă și un dezavantaj și anume că este bazată doar pe date simulate, ceea ce nu permite deducerea imediată a tipului de gol de tensiune din formele de undă ale tensiunii măsurate, deoarece tipurile de goluri pot fi estimate doar din trei valori ale tensiunii efective. Totuși, metoda poate fi folosită pentru salturile unghiului de fază care nu sunt prea mari și în special pentru erorile din sistemul de transmisie.

4.2.2. Clasificarea după metoda componentelor simetrice

Clasificarea după metoda componentelor simetrice a fost dezvoltată de Zhang și Bollen [Zhang2000]. Cu ajutorul componentelor simetrice, se dorește clasificarea caracteristicilor golurilor de tensiune în toate cele trei faze simultan, având alte criterii de bază decât cele utilizate în metoda prezentată anterior.

Metoda se bazează pe descompunerea fazorilor în componente simetrice, folosind tensiunile complexe. Pentru aplicarea metodei folosim următoarele notații:

\underline{U}_+ - tensiunea secvenței pozitive;
 \underline{U}_- - tensiunea secvenței negative;
 \underline{U}_0 - tensiune secvenței homopolare.

Într-o primă etapă se pornește de la descompunerea sistemului de tensiuni în cele trei sisteme de componente simetrice, utilizând relația (4.6).

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_+ \\ \underline{U}_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

unde: $a = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3}$

În raport cu fazele afectate într-un eveniment provocat de un gol, golurile de tensiune pot fi clasificate astfel:

- tipul A (gol de tensiune simetric) apare în cazul unei căderi egale de tensiune pe toate cele trei faze;
- tipul C (gol de tensiune nesimetric) apare când există căderi de tensiune mai pronunțate pe două faze, având variantele: C_a când căderea este între fazele S și T; C_b când căderea este între fazele R și T, respectiv C_c când căderea este între fazele R și S;
- tipul D (gol de tensiune nesimetric) apare în situația în care este afectată tensiunea unei singure faze, existând variantele: D_a când este afectată faza R, D_b pentru faza S și D_c pentru faza T.

În Fig.4.4. se arată reprezentarea fazorială pentru cele șapte tipuri de goluri de tensiune.

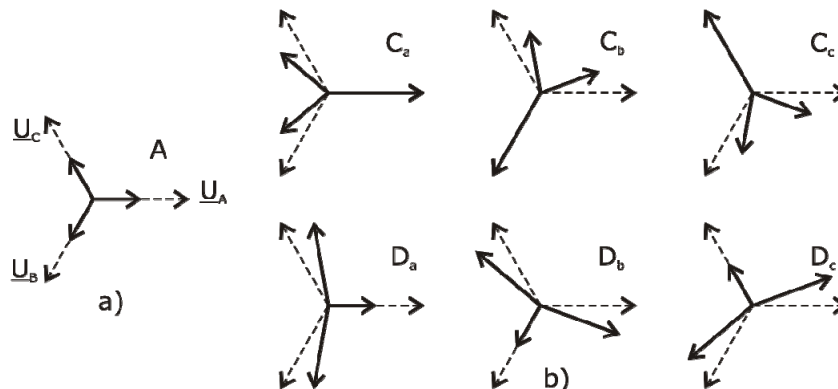


Fig.4.4. Clasificarea golurilor de tensiune după metoda componentelor simetrice: a) Gol de tensiune trifazat simetric. b) Cele șase tipuri de goluri de tensiune trifazate nesimetrice conform clasificării cu metoda componentelor simetrice.

Pentru caracterizarea golurilor de tensiune, pornind de la descompunerea sistemului de tensiuni în componente simetrice, se introduc două caracteristici: tensiunea caracteristică, notată V (valoarea absolută a fazorului complex care indică severitatea golului) și respectiv factorul de nesimetrie (PN factor) notat F , care depinde de relația dintre impedanța de secvență pozitivă și cea de secvență negativă a sursei [Zhang2000]. Tensiunea caracteristică și factorul de nesimetrie, pot fi determinate cu ajutorul componentelor de secvență, ținând cont de tipul golului de tensiune. Acestea sunt prezentate în Tabelul 4.5.

Tensiunea caracteristică reflectă severitatea evenimentului prin compararea valorii efective a acesteia, cu valoarea efectivă a tensiunii ante-perturbație, pe una

dintre faze. Factorul de nesimetrie este un fazor care caracterizează golul de tensiune în cazul de nesimetrie a sistemului, la locul de defect.

Tabelul 4.5. Definierea caracteristicilor golurilor de tensiune trifazate nesimetrice.

Faze afectate	Tip Gol	Tensiune Caracteristică	Factor PN
ST	C_a	$\underline{V} = U_+ - U_-$	$\underline{F} = U_+ + U_-$
TR	C_b	$\underline{V} = U_+ - a^2 \cdot U_-$	$\underline{F} = U_+ + a^2 \cdot U_-$
RS	C_c	$\underline{V} = U_+ - a \cdot U_-$	$\underline{F} = U_+ + a \cdot U_-$
R	D_a	$\underline{V} = U_+ + U_-$	$\underline{F} = U_+ - U_-$
S	D_b	$\underline{V} = U_+ + a^2 \cdot U_-$	$\underline{F} = U_+ - a^2 \cdot U_-$
T	D_c	$\underline{V} = U_+ + a \cdot U_-$	$\underline{F} = U_+ - a \cdot U_-$

Cu ajutorul informațiilor din Tabelul 4.5 se poate defini un gol de tensiune de tip D_a cu următoarele expresii ale tensiunilor complexe:

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= V \\ \underline{U}_S &= -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}F \\ \underline{U}_T &= -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}F \end{aligned} \quad (4.7)$$

iar un gol de tensiune de tip C_a are următoarele expresii a tensiunilor complexe:

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= F \\ \underline{U}_S &= -\frac{1}{2}F - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ \underline{U}_T &= -\frac{1}{2}F + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{aligned} \quad (4.8)$$

Relații similare se pot scrie și pentru celelalte tipuri de goluri.

4.2.3. Comparație între cele două metode de clasificare

Clasificarea ABC este o clasificare teoretică a golurilor de tensiune. Ea este foarte ușor de realizat fără a apela la metode complexe de analiză. Cel mai mare avantaj este acela de a se putea face o analiză foarte bună a transferului golurilor de tensiune prin transformatoarele trifazate. Un alt avantaj major al acestei metode este acela de limitare a numărului de cazuri posibile ce pot fi analizate. Din aceste motive, ea reprezintă metoda acceptată ca și bază a realizării standardizărilor privind analiza golurilor de tensiune.

Bineînțeles, orice metodă are și dezavantaje. Principalul ei dezavantaj este acela de a fi greu de implementat în determinarea golurilor de tensiune obținute din măsurători reale.

Clasificarea după metoda componentelor simetrice este o clasificare mai generală. Ea a fost realizată pentru a înlătura dezavantajul principal al primei metode. Această metodă este una mult mai generală, care a condus la dezvoltarea unor algoritmi foarte buni de clasificare a golurilor de tensiune. Totodată, această

metodă a condus la realizarea unei mai bune analize a efectului consumatorilor dinamici asupra golurilor de tensiune [Bollen2004b].

O comparație între cele două metode prezentate, conduce la ideea că ele nu sunt complet independente una față de cealaltă. Practic în [Bollen2003c] s-a demonstrat că prin particularizarea clasificării cu metoda componentelor simetrice se obține clasificarea ABC. La baza clasificării ABC stă particularizarea că impedanțele rețelei de secvențe directă, inversă și homopolară sunt egale. În Tabelul 4.6 se prezintă modul în care se pot stabili echivalențe între tipurile celor două metode [Bollen2003c].

Tabelul 4.6. Conversia de la caracterizarea ABC la cea după componentele simetrice.

Metoda ABC	Metoda componentelor simetrice	Tensiunea Caracteristică	Factorul de nesimetrie	Tensiunea de secvență homopolară
A	Oricare	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = h\underline{U}$	0
B	D _a	$\underline{V} = \frac{1}{3}\underline{U} + \frac{2}{3}h\underline{U}$	$\underline{F} = \underline{U}$	$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}h\underline{U} - \frac{1}{3}\underline{U}$
C	C _a	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = \underline{U}$	0
D	D _a	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = \underline{U}$	0
E	C _a	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = \frac{2}{3}\underline{U} + \frac{1}{3}h\underline{U}$	$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}h\underline{U} - \frac{1}{3}\underline{U}$
F	D _a	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = \frac{2}{3}\underline{U} + \frac{1}{3}h\underline{U}$	0
G	C _a	$\underline{V} = h\underline{U}$	$\underline{F} = \frac{2}{3}\underline{U} + \frac{1}{3}h\underline{U}$	0

4.3. Metode de determinare a tipurilor golurilor de tensiune obținute din înregistrarea curbei de tensiune

Petru a putea caracteriza un gol de tensiune care apare la un anumit moment în punctul de monitorizare, se pornește de la înregistrarea curbelor tensiunilor pe faze. Există mai multe metode prin care se poate determina tipul golului de tensiune.

Caracterizarea unică a golului de tensiune, are la bază determinarea caracteristicilor unice pe toată durata golului de tensiune. Astfel, trebuie luate în considerare următoarele precizări:

- tensiunea caracteristică, factorul de nesimetrie și tipul golului de tensiune se determină pe o perioadă a frecvenței fundamentale;
- calculul acestor caracteristici se reface la intervale de o semiperioadă sau o perioadă pe toată durata evenimentului;
- tensiunea pe durata golului de tensiune se va alege ca fiind cea mai mică valoare absolută a tensiunii caracteristice, obținută pe toată durata evenimentului;
- factorul de nesimetrie se consideră a fi cel mai mic factor de nesimetrie obținut pe durata evenimentului;

- tipul golului de tensiune este tipul rezultat în momentul când se obține cea mai mică valoare absolută a tensiunii caracteristice;
- durata golului de tensiune este determinată ca fiind durata în care tensiunea caracteristică efectivă este sub valoarea pragului stabilit.

În continuare se vor prezenta patru metode pentru determinarea caracteristicilor golurilor de tensiune.

4.3.1. Metoda componentelor simetrice

Metoda componentelor simetrice [Zhang2000], se bazează pe metoda de clasificare a golurilor de tensiune prezentată la punctul 4.3.2.

Metoda pornește de la definirea fiecărui gol de tensiune cu relații de tip (4.7) și (4.8) și își propune să determine tipul golului de tensiune, tensiune caracteristică și factorul de nesimetrie.

Pentru identificarea tipului golului de tensiune, trebuie calculate componentele de secvență directă și inversă. Pornind de la Tabelul 4.5 se pot determina componentele de secvență cu ajutorul tensiunii caracteristice și a factorului de nesimetrie. Astfel tensiunea de secvență directă este calculată cu relația (4.9) și ea este identică pentru toate tipurile de goluri de tensiune.

$$\underline{U}_+ = \frac{1}{2}(\underline{E} + \underline{V}) \quad (4.9)$$

Tensiunea de secvență inversă diferă pentru fiecare tip de gol de tensiune, cu precizarea că diferența apare în defazajul fazorilor și nu în amplitudinea lor.

$$\begin{aligned} \underline{U}_- &= \frac{1}{2}(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } C_a \\ \underline{U}_- &= \frac{1}{2}a(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } C_b \\ \underline{U}_- &= \frac{1}{2}a^2(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } C_c \\ \underline{U}_- &= -\frac{1}{2}(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } D_a \\ \underline{U}_- &= -\frac{1}{2}a(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } D_b \\ \underline{U}_- &= -\frac{1}{2}a^2(\underline{E} - \underline{V}) && \text{Tipul } D_c \end{aligned} \quad (4.10)$$

Din relația (4.9) și (4.10) se poate calcula unghiul dintre tensiunea de secvență pozitivă și cea negativă pentru fiecare gol de tensiune. Pentru situațiile în care putem aproxima că factorul de nesimetrie $F=1$, se obține relația (4.11) din care se observă că acest unghi este un multiplu de 60 (în grade).

$$\begin{aligned} \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= 0 && \text{Tipul } C_a \\ \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= 120^\circ && \text{Tipul } C_b \\ \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= -120^\circ && \text{Tipul } C_c \\ \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= 180^\circ && \text{Tipul } D_a \\ \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= -60^\circ && \text{Tipul } D_b \\ \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) &= 60^\circ && \text{Tipul } D_c \end{aligned} \quad (4.11)$$

Pentru determinarea tipului de gol de tensiune se procedează după cum urmează.

a) *Obținerea tensiunilor complexe ca funcție de timp.*

Pentru rezolvarea acestei probleme există mai multe metode. Cea mai utilizată ar fi aplicarea algoritmului DFT (Discret Fourier Transform). În [Bollen2006] se propune un algoritm mai ușor de aplicat deoarece din semnalul înregistrat, prezintă importanță pentru rezolvarea acestei probleme, extragerea tensiunii pe fundamentală. Pentru aplicarea acestui algoritm se consideră următoarea expresie:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_{Re} \cos(2\pi f t) - \sqrt{2} \cdot U_{Im} \sin(2\pi f t) \quad (4.12)$$

unde f este frecvența sistemului.

În continuare se vor defini următorii termeni:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= \sqrt{2} \cdot u(t) \cdot \cos(2\pi f t) \\ u_q(t) &= \sqrt{2} \cdot u(t) \cdot \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Înlocuind relația (4.12) în (4.13) și făcând o mediere a semnalelor mai sus definite pe intervale de minim o semiperioadă sau multiplii de o semiperioadă, se obține următoarea relație:

$$U_{Re}(t) + jU_{Im}(t) = \overline{u_d(t)} - \overline{u_q(t)} \quad (4.14)$$

Valorile complexe ale tensiunilor de fază, se obțin prin împărțirea valorilor obținute cu relația (4.14) pentru un moment de timp t , la valorile obținute tot cu relația (4.14) pentru faza R la momentul $t=0$.

$$\begin{aligned} \underline{U}_R(t) &= \frac{U_{ReR}(t) + jU_{ImR}(t)}{U_{ReR}(0) + jU_{ImR}(0)} \\ \underline{U}_S(t) &= \frac{U_{ReS}(t) + jU_{ImS}(t)}{U_{ReR}(0) + jU_{ImR}(0)} \\ \underline{U}_T(t) &= \frac{U_{ReT}(t) + jU_{ImT}(t)}{U_{ReR}(0) + jU_{ImR}(0)} \end{aligned} \quad (4.15)$$

b) *Obținerea componentelor de secvență pentru sistemul de tensiuni mai sus determinat.*

Componentele de secvență a tensiunii se determină prin aplicarea metodei clasice. Astfel:

$$\begin{aligned} \underline{U}_+ &= \frac{1}{3} \cdot [\underline{U}_R(t) + a\underline{U}_S(t) + a^2\underline{U}_T(t)] \\ \underline{U}_- &= \frac{1}{3} \cdot [\underline{U}_R(t) + a^2\underline{U}_S(t) + a\underline{U}_T(t)] \\ \underline{U}_0 &= \frac{1}{3} \cdot [\underline{U}_R(t) + \underline{U}_S(t) + \underline{U}_T(t)] \end{aligned} \quad (4.16)$$

c) *Determinarea unghiului dintre componentele de secvență pozitivă și negativă a tensiunilor.*

De asemenea și pentru determinarea unghiului dintre componentele de secvență directă și inversă a tensiunilor (α_T), există mai multe metode. Una dintre metode pornește de la extragerea unghiului pentru fiecare componentă în parte și apoi determinarea unghiului dintre ele.

Cea mai utilizată metodă, pornește de la fazorii tensiunii directe și inverse, iar determinarea unghiul se obține dintr-un calcul cu numere complexe.

$$\alpha_T = \text{unghi}(\underline{U}_+, \underline{U}_-) = \arg\left(\frac{\underline{U}_-}{\underline{U}_+}\right) \quad (4.17)$$

d) *Determinarea tipului golului de tensiune.*

Dacă se cunoaște unghiul α_T se poate calcula un coeficient (T) care va indica tipul golului de tensiune.

$$T = \frac{1}{60^\circ} \cdot \alpha_T \quad (4.18)$$

Acest coeficient trebuie rotunjit la cel mai apropiat *număr întreg*. El poate să ia valori de la 0 la 5. Cunoscând valoarea lui T și ținând cont de relația (4.11) se poate determina tipul golului de tensiune astfel:

$$\begin{aligned} T = 0 & \quad \text{Tipul } C_a \\ T = 1 & \quad \text{Tipul } D_c \\ T = 2 & \quad \text{Tipul } C_b \\ T = 3 & \quad \text{Tipul } D_a \\ T = 4 & \quad \text{Tipul } C_c \\ T = 5 & \quad \text{Tipul } D_b \end{aligned} \quad (4.19)$$

e) *Determinarea tensiunii caracteristice și a factorului de nesimetrie.*

Din Tabelul 4.5 se poate determina, cu ajutorul coeficientului T , tensiunea caracteristică și factorul de nesimetrie cu relația (4.20).

$$\begin{aligned} \underline{V} &= \underline{U}_+ - b^{6-T} \underline{U}_- \\ \underline{F} &= \underline{U}_+ + b^{6-T} \underline{U}_- \end{aligned} \quad (4.20)$$

unde:

$$b = -a^2 = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j \quad (4.21)$$

În Fig.4.5 se prezintă graficul obținut prin aplicarea acestei metode, unei măsurători realizate în stația Mociur, pe bara de $110kV$ care alimentează stația Bârzava, din județul Caraș-Severin. Evenimentul s-a produs datorită unui defect în rețeaua de $110kV$ pe linia Reșița-Anina.

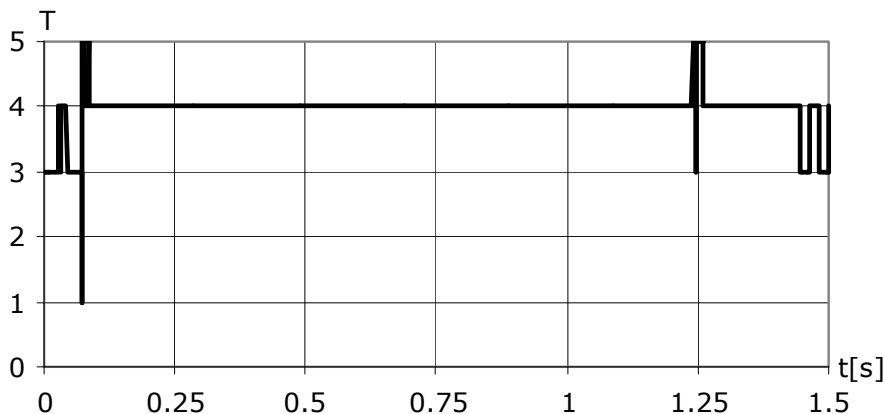


Fig.4.5. Coeficientul T care indică tipul golului de tensiune.

În prealabil s-a determinat existența a două goluri de tensiune consecutive. Primul apare la momentul $0.08s$ și ține aproximativ până la secunda 0.35 , în care

apare al doilea gol de tensiune care durează până în secunda 1,25. Aceste informații se pot observa în graficul din Fig.4.6.

Din Fig.4.5 se poate trage concluzia că cele două goluri de tensiune sunt de același tip și anume C_c . Din calcule, cu ajutorul relațiilor (4.20), s-au determinat tensiunile caracteristice și factorii de nesimetrie, în u.r., pentru cele două goluri.

- primul gol: $\underline{V}=0.55-0.05i$ $\underline{F}=0.86-0.03i$
- al doilea gol: $\underline{V}=0.61-0.07i$ $\underline{F}=0.93-0.02i$

4.3.2. Metoda celor șase faze

Metoda celor șase faze [Bollen2000b] este cea mai simplă metodă dezvoltată pentru caracterizarea golurilor de tensiune.

Într-o primă etapă, se procedează la extragerea din tensiunile de fază, a componentei de secvență homopolară, cu relațiile (4.22), deoarece aceasta nu afectează tipul golului de tensiune. În a doua etapă se calculează tensiunile de linie cu relația (4.23), de unde se poate observa că acestea au fost reduse cu coeficientul $\sqrt{3}$, pentru a putea fi comparate cu tensiunile de fază.

$$\begin{aligned} U_R(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[u_{Ri} - \frac{1}{3}(u_{Ri} + u_{Si} + u_{Ti}) \right]^2} \\ U_S(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[u_{Si} - \frac{1}{3}(u_{Ri} + u_{Si} + u_{Ti}) \right]^2} \\ U_T(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[u_{Ti} - \frac{1}{3}(u_{Ri} + u_{Si} + u_{Ti}) \right]^2} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} U_{RS}(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[\frac{u_{Ri} - u_{Si}}{\sqrt{3}} \right]^2} \\ U_{ST}(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[\frac{u_{Si} - u_{Ti}}{\sqrt{3}} \right]^2} \\ U_{TR}(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k-N+1}^k \left[\frac{u_{Ti} - u_{Ri}}{\sqrt{3}} \right]^2} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Caracteristicile golului de tensiune se obțin direct din rezultatele obținute cu relațiile (4.22) și (4.23), astfel:

- tensiune caracteristică este cea mai mică tensiune dintre cele șase tensiuni efective;
- factorul de nesimetrie este cea mai mare tensiune dintre cele șase tensiuni efective;
- tipul golului de tensiune este dat de cea mai mică tensiune dintre cele șase tensiuni efective conform celor din Tabelul 4.7.

Tensiunea caracteristică și factorul de nesimetrie au fost definite ca și valori complexe. În urma celor prezentate la acest algoritm ele au fost determinate ca și valori efective, ceea ce înseamnă că avem nevoie să determinăm unghiul lor.

Unghiul tensiunii caracteristice se determină ca fiind unghiul tensiunii care ne dă cea mai mică valoare efectivă. Unghiul factorului de nesimetrie este unghiul tensiunii care ne dă cea mai mare valoare efectivă.

Tabelul 4.7. Tipul golului de tensiune conform algoritmului celor șase faze.

Cea mai mică tensiune efectivă	U_R	U_S	U_T	U_{ST}	U_{TR}	U_{RS}
Tipul golului	D_a	D_b	D_c	C_a	C_b	C_c

Această metodă este foarte ușor de implementat dar are și anumite defecte. Cel mai important defect este acela de a nu determina corect tipul golului de tensiune pentru situații în care avem un salt de unghi prea mare.

În Fig.4.6. se prezintă aplicarea acestei metode, evenimentului prezentat în paragraful 4.3.1 din care rezultă conform celor din Tabelul 4.7 că ambele goluri de tensiune sunt de tipul C_c . Conform celor de mai sus, se determină tensiunile caracteristice și factorul de nesimetrie (în valori efective) ca fiind:

- primul gol: $V = 35830V$ $F=56520V$
- al doilea gol: $V = 39710V$ $F=60760V$

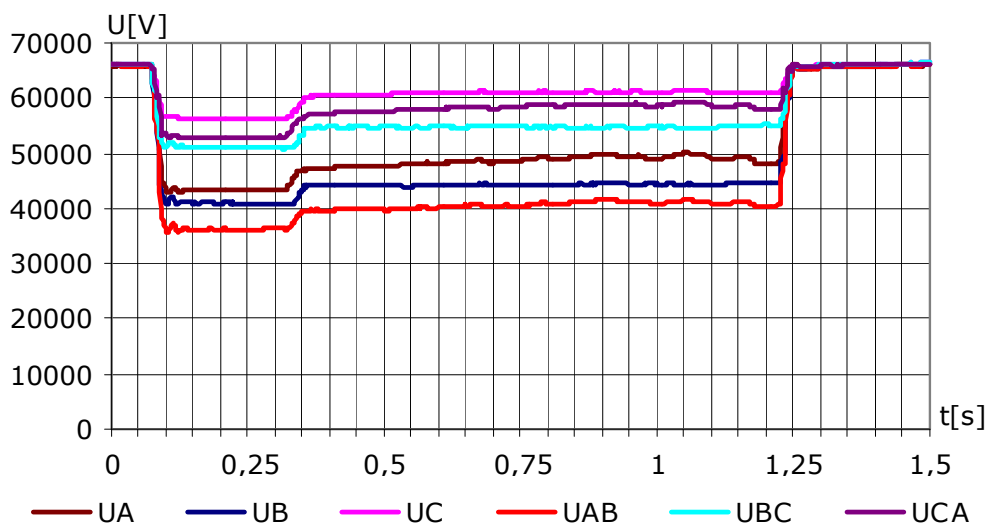


Fig.4.6. Tensiunile efective de linie și de fază determinate conform metodei celor șase faze.

Se observă că un dezavantaj important al acestei metode este dat de imposibilitatea determinării tensiunii caracteristice și a factorului de nesimetrie în valori complexe.

4.3.3. Metoda grafică a lui Leborgne de clasificare a golului de tensiune

În paragraful anterior s-a prezentat o metodă care utilizează tensiunile efective de fază și de linie pentru determinarea tipului golului de tensiune, conform clasificării după metoda componentelor simetrice.

În lucrările sale [Leborgne2004] și [Leborgne2007], Leborgne a adaptat această metodă pentru determinarea tipului golului de tensiune, conform clasificării ABC.

Se consideră că se cunosc valorile momentane ale tensiunilor pe faze, obținute prin înregistrarea cu un aparat de monitorizare. Din aceste valori se pot determina tensiunile momentane de linie cu relațiile (4.24) din care se observă că acestea au fost împărțite la factorul $\sqrt{3}$, pentru ca acestea să poată fi comparate cu tensiunile de fază. Apoi toate cele șase tensiuni se determină ca și valori efective calculate pe o perioadă, în u.r.

$$\begin{aligned} U_{RS}(t) &= \frac{u_R(t) - u_S(t)}{\sqrt{3}} \\ U_{ST}(t) &= \frac{u_S(t) - u_T(t)}{\sqrt{3}} \\ U_{TR}(t) &= \frac{u_T(t) - u_R(t)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

În [Leborgne2004], autorul a determinat relația de legătură dintre cea mai mică tensiune de fază și cea mai mică tensiune de linie pentru fiecare tip de gol în parte, pornind de la relațiile de caracterizare a golurilor de tensiune din Tabelul 4.3. Aceste relații sunt prezentate în Tabelul 4.8.

Tabelul 4.8. Relații teoretice dintre tensiunile de fază și tensiunile de linie, în cazul diferitelor tipuri de goluri de tensiune.

Tipul golului	$U_l = f(U_{f_min})$
A	$U_{l_minA} = U_{f_min}$
B	$U_{l_minB} = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}} + \frac{U_{f_min}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \frac{1}{4}}$
C	$U_{l_minC} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot U_{f_min}^2 - \frac{1}{3}}$
D	$U_{l_minD} = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot U_{f_min}^2}$
E	$U_{l_minE} = U_{f_min}$
F	$U_{l_minF} = \sqrt{\frac{\left(2 + \frac{1}{3}\right) \cdot U_{f_min}^2 + \frac{1}{3} U_{f_min} + \frac{1}{3}}{3}}$
G	$U_{l_minG} = -0.0707 + \sqrt{\frac{3.112 \cdot U_{f_min}^2 - 0.327}{1.556}}$

Cu aceste relații se ridică curbele caracteristice $U_l = f(U_{f_min})$, pentru fiecare tip de gol în parte (Fig.4.7).

Din relațiile din Tabelul 4.8 se pot trage următoarele concluzii:

- pentru golul de tip B, dacă avem o tensiune de fază nulă, va rezulta tensiunea minimă de linie ca fiind $\sqrt{1/3}$ u.r.;

- pentru goluri de tipul C, tensiunea minimă de fază poate fi $0,5u.r.$, situație pentru care tensiunea de linie este zero;
- pentru golul de tip D, tensiunea minimă de linie este $0,5u.r.$ și rezultă pentru situația în care tensiunea de fază este nulă;
- pentru golul de tip F avem o situație asemănătoare cu cea de la tipul D cu diferența că tensiunea minimă de linie va avea valoarea $1/3u.r.$;
- pentru golul de tip G, situația este asemănătoare cu cea de la tipul C, tensiunea minimă de fază putând să ia valoarea $1/3u.r.$

Pentru a determina tipul golului de tensiune din valorile efective a celor șase tensiuni calculate în unități relative, se determină cea mai mică tensiune de fază (U_{f_min}) și cea mai mică tensiune de linie (U_{L_min}). Cu aceste valori se determină un punct $X(U_{f_min}, U_{L_min})$, care se reprezintă pe graficul din Fig.4.7 care conține curbele caracteristice pentru fiecare gol de tensiune. Tipul golului de tensiune este determinat de caracteristica față de care punctul mai sus definit este cel mai aproape.

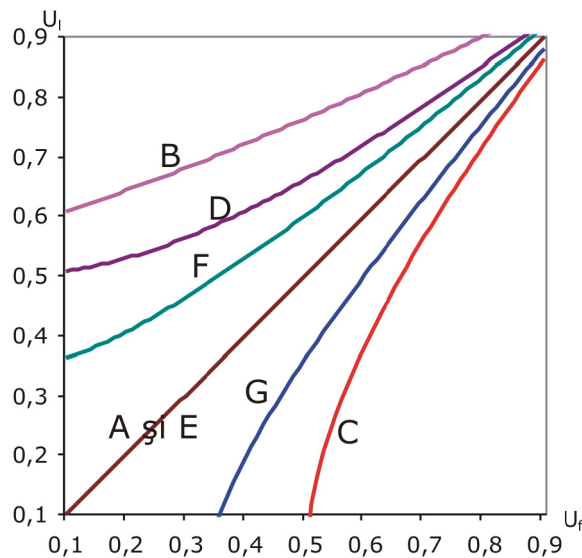


Fig.4.7. Curbe determinate teoretic pentru fiecare tip de gol de tensiune cu algoritmul Leborgne.

Se observă, că această metodă este foarte simplistă, determinarea tipului golului de tensiune fiind foarte rapidă. Totuși ea are câteva inconveniente mari:

- metoda determină doar tipul golului de tensiune, fără a determina celelalte caracteristici ale acestuia;
- metoda este neconcludentă pentru goluri de tensiune în care tensiunea remanentă pe fază sau pe linie, ia valori foarte scăzute;
- metoda nu face distincție între tipurile A și E.

4.3.4. Metoda grafică a lui Bollen de clasificare a golului de tensiune

Acest algoritm are la bază tensiunile minime și maxime de fază și în urma aplicării sale, se obține tipul golului conform clasificării ABC. Pentru aplicarea acestui algoritm, cele șapte tipuri de goluri de tensiune sunt grupate în două grupuri, în funcție de numărul de faze pentru care există cădere mai mare de tensiune.

Pentru goluri de tensiune măsurate, de cele mai multe ori tensiunile efective pe cele trei faze diferă ca valori, între ele. Pentru a se face selecția între golurile cu căderi de tensiune pe o fază sau pe două, cele trei tensiuni măsurate sunt sortate în ordine crescătoare, $U_x \leq U_y \leq U_z$. După aceasta, evenimentele sunt împărțite în două grupuri:

$U_z - U_y < U_y - U_x$ grup care conține căderi de tensiune pe o fază sau pe trei faze;

$U_z - U_y > U_y - U_x$ grup care conține căderi de tensiune pe două faze sau pe trei faze.

1) *Căderi de tensiune pe o fază:* Golurile cu căderi de tensiune pe o singură fază sunt caracterizate de faptul că tensiunea pe o fază are o cădere de tensiune mult mai pronunțată decât pe celelalte două. Acest grup conține tipurile A, B, D și F. În general cele două tensiuni de valori mai mari nu sunt egale între ele. Din acest motiv, în calcule se consideră media aritmetică a lor:

$$U_{f_max} = \frac{\max(U_R, U_S, U_T) + \text{med}(U_R, U_S, U_T)}{2} = \frac{U_y + U_z}{2} \quad (4.25)$$

2) *Căderi de tensiune pe două faze:* Se poate aplica aceeași metodă ca și cea de la căderile pe o singură fază. Aceasta include goluri de tensiune de tipul A, C, E și G. Pentru tensiunea minimă, se consideră media aritmetică a celor două tensiuni mai mici:

$$U_{f_min} = \frac{\min(U_R, U_S, U_T) + \text{med}(U_R, U_S, U_T)}{2} = \frac{U_x + U_y}{2} \quad (4.26)$$

După ce am determinat grupul din care face parte golul de tensiune se reprezintă pe graficul corespunzător (Fig.4.8), tensiunea efectivă maximă de fază ca funcție de tensiune efectivă minimă de fază. Tipul golului de tensiune este determinat de caracteristica față de care este cel mai aproape punctul $X(U_{f_min}, U_{f_max})$.

În plus față de metoda propusă de Leborgne, autorul a dezvoltat această metodă și pentru determinarea amplitudinii golului de tensiune, cu relațiile prezentate în Tabelul 4.10.

Tabelul 4.10. Relații pentru determinarea amplitudinii golurilor de tensiune când se cunoaște valorile efective ale tensiunilor pe faze.

Tipul golului	$hU=f(U_f)$
A	$hU = \frac{U_x + U_y + U_z}{3}$
B	$hU = U_x$
C	$U = \sqrt{\frac{2}{3}(U_x + U_y) - \frac{1}{3}}$
D	$hU = U_x$
E	$hU = \frac{U_x + U_y}{2}$
F	$hU = U_x$
G	$hU = \sqrt{\frac{2}{3}U_x^2 + \frac{2}{3}U_y^2 - \frac{1}{3}U_z^2}$

Se poate observa că acest algoritm este puțin mai complex, determinarea tipului golului de tensiune realizându-se în două etape. Într-o primă etapă se determină numărul de faze afectate, după care se determină tipul golului de tensiune, prin analiză grafică. Totodată, acest algoritm are și avantajul de a putea determina amplitudinea golului de tensiune.

4.3.5. Comparație între cele două metode grafice

Pentru compararea celor două algoritme bazate pe analiză grafică, se propune un studiu de caz [Molnar2009] pe o bază de date înregistrată la bornele de înaltă tensiune ale stației Mociur, care alimentează stația Bârzava din județul Caraș-Severin. Baza de date conține valorile momentane ale tensiunilor pe cele trei faze, achiziționate cu o rata de eșantionare de 1kHz.

Într-o primă etapă, se prelucrează baza de date pentru a obține tensiunile de linie reduse cu factorul $\sqrt{3}$ necesare pentru primul algoritm. Ulterior se calculează valorile efective ale celor șase tensiuni, urmate de aplicarea celor doi algoritmi.

Din analiza bazei de date s-a ales prezentarea a două cazuri mai semnificative:

- cazul 1, în care avem cădere de tensiune mai mare pe o singură fază, prezentat în Fig.4.9.a (eveniment produs pe linia Arad-Mureșel) .
- cazul 2, în care avem cădere de tensiune mai mare pe două faze, prezentat în Fig.4.9.b (eveniment produs pe linia Reșița-Anina).

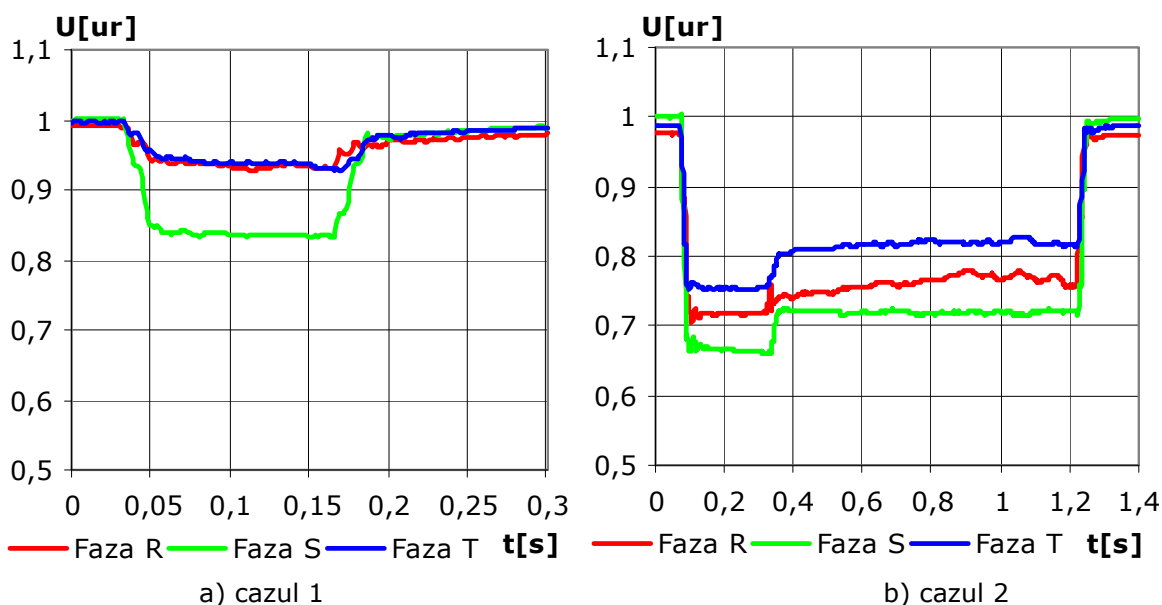
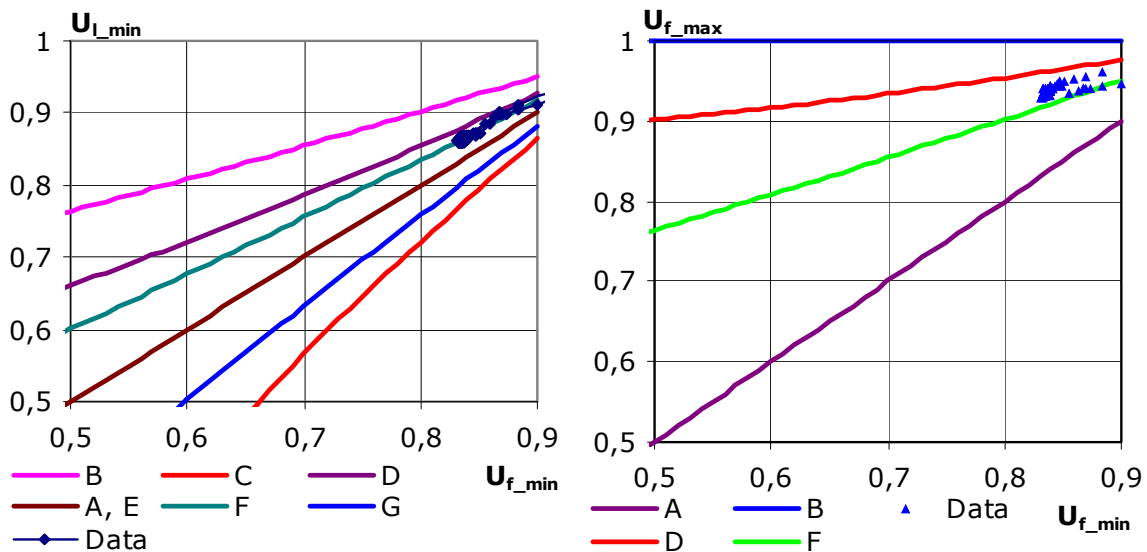


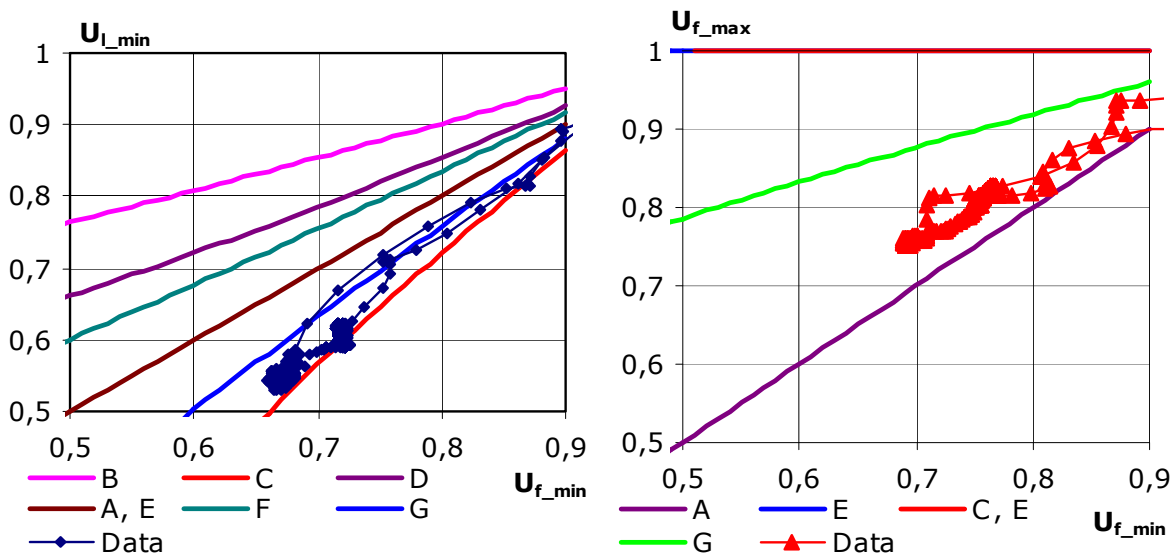
Fig.4.9. Tensiuni de fază în valori efective.

În Fig.4.10 se prezintă reprezentările grafice obținute cu cei doi algoritmi pentru cazul 1. Se observă, conform algoritmului Leborgne, că tipul golului este F, respectiv conform algoritmului Bollen valorile măsurate sunt grupate între tipul F și D, fiind mai aproape de tipul F. Deci, ca și concluzie pentru acest caz putem spune că tipul golului este F. În plus, se poate observa că primul algoritm dă rezultatul mult mai exact decât al doilea algoritm.

În Fig.4.11 pe reprezentările grafice obținute cu cei doi algoritmi pentru cazul 2, se observă concentrarea măsurătorilor în două grupuri, ceea ce presupune existența unui gol de tensiune în două trepte. Din analiza graficului Fig.4.11.a se observă că grupurile de valori măsurate sunt situate între tipul C și G, cu o apropiere mai pronunțată față de tipul C. Din Fig.4.11.b se observă că grupurile de valori măsurate sunt situate între tipul G și A, cu o apropiere mai pronunțată față de tipul A. Din analiza diagramei fazoriale a rezultat că tipul golului de tensiune este G. În concluzie ambele algoritme au furnizat informații eronate privind tipul golului de tensiune. În schimb, dacă se analizau ambele algoritme împreună, atunci puteam spune cu certitudine că tipul golului este G.



a) Metoda Leborgne; b) Metoda Bollen.
Fig.4.10. Determinarea tipului de gol de tensiune cu metode grafice - cazul 1.



a) Metoda Leborgne; b) Metoda Bollen.
Fig.4.11. Determinarea tipului de gol de tensiune cu metode grafice - cazul 2.

În urma analizei comparative s-a observat că algoritmul Leborgne, introduce erori în special la selecția între tipurile C și G, dar și între tipurile A și E (pentru care se poate observa că tensiunile de linie minime determinate teoretic sunt identice).

Pentru algoritmul Bollen, se obțin rezultate bune pentru salturi ale unghiului de fază mici. O altă caracteristică a acestui algoritm este că pentru goluri de tensiune mai severe, algoritmul dă rezultate mai corecte. Oricum, pentru tipurile C și E, nu se poate obține un rezultat bun pentru căderi de tensiune mici, deoarece tensiunea maximă teoretică de fază ia valoarea unu în u.r. pentru ambele cazuri. Acuratețea algoritmului pentru tipurile F și G este afectată de raportul dintre impedanțele sursei de secvență homopolară și cea de secvență pozitivă văzute la locul de scurtcircuit.

Din analiza celor doi algoritmi descriși anterior se poate spune că algoritmul Bollen este mai bun deoarece furnizează și informații despre amplitudinea golului de tensiune. Totodată se poate spune că nici unul dintre algoritme nu poate fi utilizat cu siguranță într-un echipament de monitorizare a calității energiei electrice.

Prin urmare, în continuare se propune o dezvoltare a studiilor pe această temă pentru a găsi un algoritm mai eficient pentru monitorizarea golurilor de tensiune, chiar dacă acest lucru implică obținerea unui algoritm mai complex și mai greu de implementat.

4.4. Metodă propusă pentru caracterizarea golurilor de tensiune

În acest paragraf se va propune o metodă nouă de determinare a caracteristicilor golurilor de tensiune conform clasificării ABC [Molnar2010a]. Metoda are la bază algoritmul de identificare grafică a golurilor de tensiune propus de Leborgne.

Propunerea de modificare constă în eliminarea identificării grafice datorită erorilor pe care le poate produce și înlocuirea acesteia cu un algoritm matematic bazat pe relațiile din Tabelul 4.8.

Metoda constă în utilizarea tensiunii minime pe fază, pentru determinarea celor șapte tensiunii de linie, teoretice ($U_{l_teoretic}$), pentru fiecare tip de gol în parte, utilizând relațiile din Tabelul 4.8.

$$U_{l_teoretic} = f(U_{f_min}) \quad (4.27)$$

Pentru situațiile particulare a tipurilor C și G, se pun anumite condiții speciale cum ar fi:

- dacă $U_f < 0.5u.r.$ atunci tensiunea de linie pentru tipul C nu mai are sens, deoarece în acest caz golul de tensiune nu poate fi de tipul C;
- dacă $U_f < 0.34u.r.$ rezultă că golul de tensiune nu poate fi de tipul G.

Determinarea tipului golului de tensiune se face prin compararea tensiunilor de linie teoretice calculate, cu cea mai mică tensiune de linie ($U_{l_măsurat}$) obținută din măsurători la momentul k , în care a fost determinată cea mai mică tensiune de fază. În acest scop se calculează distanțele T_i pentru fiecare tip cu relația:

$$T_i = |U_{l_teoretic_i} - U_{l_măsurat}| \quad (4.28)$$

unde cu i s-a notat tipul golului de tensiune A, B, C, D, E, F, G.

În final tipul golului de tensiune este determinat de cel mai mic, dintre termenii T_i .

$$T_{min} = \min(T_i) \quad \text{pentru } i=A,B,C,D,E,F,G \quad (4.29)$$

Pentru testarea algoritmului, s-a luat în considerare o bază de date și s-a identificat tipul golurilor de tensiune. Acestea au fost comparate cu diagramele

fazoriale extrase. În urma analizei comparative s-a observat că algoritmul introduce erori în special la selecția între tipurile C și G, dar și între tipurile A și E (pentru care se poate observa că tensiunile de linie minime determinate teoretic sunt identice).

Ca o soluție la această problemă am considerat necesară evaluarea tensiunii maxime de linie care se obține între faza neafectată și o fază afectată. Pornind de la relațiile din Tabelul 4.3, în care se consideră $U=1u.r.$, va rezulta tensiunea de linie maximă, redusă cu coeficientul $\sqrt{3}$ (pentru a putea fi comparată cu tensiunea minimă pe fază), pentru fiecare tip luat în considerare.

a) *Tipul C*

Tensiunea complexă maximă de linie se determină din diferența celor două tensiuni de fază care o compun:

$$\underline{U}_{I_maxC} = \underline{U}_{RS} = \frac{\underline{U}_R - \underline{U}_S}{\sqrt{3}} = \frac{1 - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)h}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}h \quad (4.30)$$

Pentru algoritmul propus, prezintă interes, tensiunea efectivă maximă de linie, care se determină astfel:

$$U_{I_maxC} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}h\right)^2} = \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{h^2}{4}} \quad (4.31)$$

În relația (4.31) s-a determinat tensiunea efectivă maximă de linie ca și funcție de h , adică valoarea golului de tensiune. În aplicația propusă prezintă importanță determinarea acestei tensiuni ca și funcție de tensiunea efectivă minimă de fază. În acest scop se calculează valoarea efectivă a tensiunii pe faza S (relația 4.32), după care se determină valoarea lui h ca funcție de tensiunea minimă U_{f_min} , (relația 4.33).

$$U_{f_min}^2 = U_S^2 = \left(-\frac{1}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}h\right)^2 = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}h^2 \quad (4.32)$$

$$h^2 = \left(U_{f_min}^2 - \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{4}{3} = \frac{4}{3} \cdot U_{f_min}^2 - \frac{1}{3} \quad (4.33)$$

Dacă se înlocuiește (4.33) în (4.31) se determină tensiunea efectivă maximă de linie ca și funcție de tensiunea efectivă minimă de fază.

$$U_{I_maxC} = \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{\frac{4}{3} \cdot U_{f_min}^2 - \frac{1}{3}}{4}} = \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{U_{f_min}^2}{3} - \frac{1}{12}} = \sqrt{\frac{2 + U_{f_min}^2}{3}} \quad (4.34)$$

b) *tipul G:*

Procedeul de calcul este identic cu cel prezentat mai sus. Astfel:

$$\underline{U}_{I_maxG} = \frac{\underline{U}_R - \underline{U}_S}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{2}{3} + \frac{h}{3} - \left(-\frac{1}{3} - \frac{h}{6} - j\frac{\sqrt{3}}{2}h\right)}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{h}{2\sqrt{3}} + j\frac{h}{2} \quad (4.35)$$

$$U_{I_maxG} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{h}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{h}{3} + \frac{h^2}{12} + \frac{h^2}{4}} = \sqrt{\frac{1+h+h^2}{3}} \quad (4.36)$$

$$U_{f_min}^2 = \left(-\frac{1}{3} - \frac{h}{6}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}h\right)^2 = \frac{1}{9} + \frac{h}{9} + \frac{h^2}{36} + \frac{3}{4}h^2 = \frac{1}{9}(1 + h + 7h^2)$$

$$9U_{f_min}^2 = \left(7h^2 + h + \frac{1}{4}\right) - \frac{1}{4} + 1 = \left(\sqrt{7}h + \frac{1}{2\sqrt{7}}\right)^2 + \frac{27}{28} \quad (4.37)$$

$$\sqrt{7}h + \frac{1}{2\sqrt{7}} = \sqrt{9U_{f_min}^2 - \frac{27}{28}}$$

$$h = \frac{\sqrt{9U_{f_min}^2 - \frac{27}{28}} - \frac{1}{2\sqrt{7}}}{\sqrt{7}} = \sqrt{\frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{196}} - \frac{1}{14} \quad (4.38)$$

$$\frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{196} = a$$

$$U_{l_maxG} = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{a} - \frac{1}{14} + \left(\sqrt{a} - \frac{1}{14}\right)^2}{3}} = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{a} - \frac{1}{14} + a - \frac{\sqrt{a}}{7} + \frac{1}{14^2}}{3}} = \quad (4.39)$$

$$= \sqrt{\frac{\frac{6}{7}\sqrt{a} + a + \frac{183}{14^2}}{3}} = \sqrt{\frac{\frac{6}{7}\sqrt{\frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{196}} + \frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{196} + \frac{183}{14^2}}{3}}$$

$$U_{l_maxG} = \sqrt{\frac{2}{7}\sqrt{\frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{196}} + \frac{3}{7}U_{f_min}^2 - \frac{13}{49}} \quad (4.40)$$

Dacă se înlocuiește relația (4.38) în (4.36) se obține o expresie foarte dificilă de urmărit. În schimb se poate determina dependența dintre tensiunile efective maximă și minimă de linie, relație care poate fi folosită cu succes, deoarece în prima etapă a metodei este obligatoriu determinarea tensiunii efective minime de linie.

$$U_{l_minG} = \frac{U_S - U_T}{\sqrt{3}} = \frac{\left(-\frac{1}{3} - \frac{h}{6} - j\frac{\sqrt{3}}{2}h\right) - \left(-\frac{1}{3} - \frac{h}{6} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h\right)}{\sqrt{3}} = -jh \quad (4.41)$$

$$U_{l_minG} = \sqrt{(-h)^2} = h \quad (4.42)$$

$$U_{l_minG} = \sqrt{\frac{9}{7}U_{f_min}^2 - \frac{27}{7 \cdot 28} - \frac{1}{14}} \quad (4.43)$$

Din analiza rezultatelor obținute se poate spune că în [Leborgne2004] relația de calcul a tensiunii efective minime de linie, pentru tipul G, este o aproximație (Tabelul 4.8), iar relația exactă este (4.43).

Înlocuind relația (4.43) în (4.36) se poate determina relația de dependență dintre tensiunea efectivă maximă de linie și tensiunea efectivă minimă de linie, pentru tipul G.

$$U_{l_maxG} = \sqrt{\frac{1 + U_{l_minG} + U_{l_minG}^2}{3}} \quad (4.44)$$

Practic cu relațiile (4.40) pentru tipul C și cu (4.40) sau (4.44) pentru tipul G, se determină tensiunile efective maxime de linie, teoretice, care pot să apară pentru tipul de gol respectiv. Aceste tensiuni se compară cu tensiunea maximă înregistrată și astfel obținem tipul golului de tensiune.

O altă problemă majoră este aceea de a face distincție dintre un gol de tip A, respectiv unul de tip E. Dacă se analizează Tabelul 4.8 se observă că cele două goluri de tensiune sunt definite de aceiași relație.

Și această problemă se poate rezolva aplicând același procedeu. Golul de tensiune de tip A, este simetric și echilibrat ceea ce conduce la relația (4.45).

$$U_{I_max A} = U_{f_min} \quad (4.45)$$

Pentru golul de tip E, se determină tensiunea efectivă maximă de linie prin același procedeu aplicat pentru tipurile C și G.

$$U_{I_max E} = U_{RS} = \frac{U_R - U_S}{\sqrt{3}} = \frac{1 - \left(-\frac{1}{2}h - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)h}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{h}{2\sqrt{3}} + j\frac{1}{2}h \quad (4.46)$$

$$U_{I_max E} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{h}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}h\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{h}{3} + \frac{h^2}{12} + \frac{h^2}{4}} = \sqrt{\frac{1+h+h^2}{3}} \quad (4.47)$$

$$U_{f_min}^2 = U_B^2 = \left(-\frac{1}{2}h\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}h\right)^2 = \frac{1}{4}h^2 + \frac{3}{4}h^2 = h^2 \quad (4.48)$$

$$h = U_{f_min} \quad (4.49)$$

$$U_{I_max E} = \sqrt{\frac{1 + U_{f_min} + U_{f_min}^2}{3}} \quad (4.50)$$

Cu relațiile (4.45) pentru tipul A și (4.50) pentru tipul E, se obțin tensiunile efective maxime de linie, teoretice, care sunt comparate ulterior cu tensiunea efectivă maximă de linie determinată din achiziția datelor. Tipul golului de tensiune este dat de tensiunea efectivă maximă de linie, teoretică, care este mai aproape ca valoare de tensiunea efectivă maximă de linie înregistrată.

Metoda propusă este ușor de implementat software utilizând schema logică prezentată în Fig.4.12.

Ca și o concluzie la determinarea tipului golului de tensiune, se poate spune că trebuie parcurse două etape:

- etapa 1 în care se determină golul de tensiune cu relațiile clasice din Tabelul 4.8;
- etapa 2 în care se determină golul de tensiune folosind tensiunile maxime de linie (etapă aplicabilă doar dacă este cazul).

Odată determinat tipul golului de tensiune, mai trebuie determinate caracteristicile lui, care în cazul clasificării ABC sunt amplitudinea golului de tensiune, și faza sau fazele afectate.

Amplitudinea golului de tensiune ($h[\%]$ – din Tabelul 4.3), se poate calcula din tensiunea efectivă de fază minimă. Precizăm că în cazul de față rezultatele obținute sunt în u.r. și ele trebuie înmulțite cu 100 pentru a fi determinate ca și procentaje.

Analizând Tabelul 4.3, se constată, că golurile de tensiune de tip A, B, D, F au o scădere majoră de tensiune pe o singură fază (în cazul tratat în tabel – Faza R), și prin urmare se determină direct că $h=U_{f_min}$. Pentru celelalte tipuri de goluri de tensiune, h a fost determinat în demonstrațiile anterioare. Prin urmare h se poate determina din relația (4.33) pentru tipul C, astfel:

$$h = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot U_{f_min}^2 - \frac{1}{3}} \quad (4.51)$$

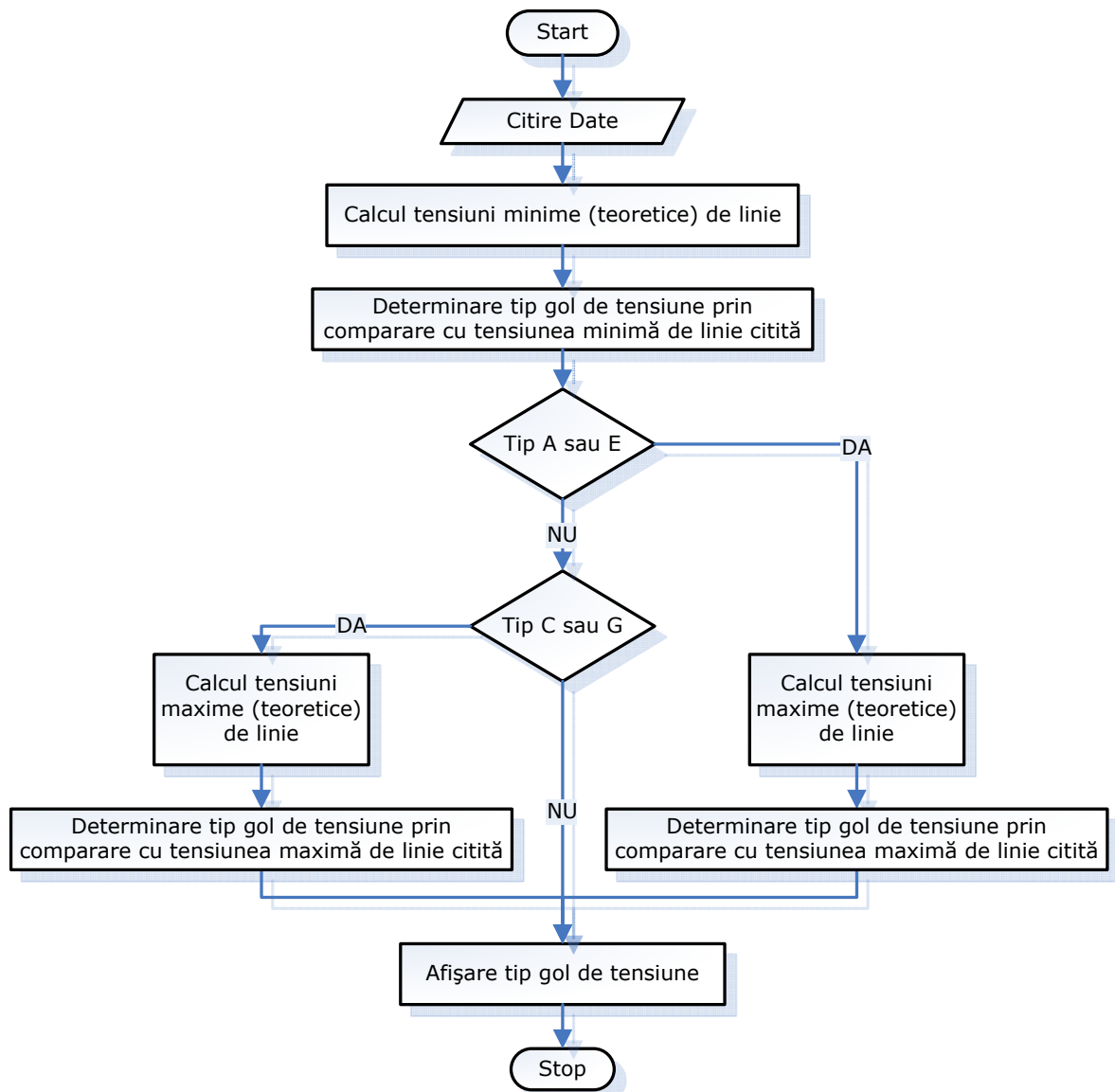


Fig.4.12. Schemă logică algoritm determinare gol de tensiune.

Pentru tipul E, h este determinat de relația (4.49), iar pentru tipul G de relația (4.38).

Pentru determinarea fazelor afectate se pornește de la tipul golului de tensiune determinat anterior. Astfel, dacă golul de tensiune este de tipul A, rezultă că toate cele trei fazele sunt afectate la fel. Dacă golul de tensiune este unul dintre tipurile B, D, F rezultă că una dintre faze este afectată mai pronunțat, iar aceasta se determină prin compararea valorilor efective a tensiunilor pe faze, la momentul k în care s-a determinat U_{f_min} . În final dacă golul de tensiune s-a obținut ca fiind unul dintre tipurile C, E, G atunci două faze sunt afectate mai pronunțat, iar acestea se determină tot prin compararea tensiunilor de fază.

În concluzie această metodă este mai laborioasă, dar în schimb ea este mai puțin supusă erorilor de determinare. Totuși, acestea pot să apară în situații în care apare o modificare accentuată în defazajele fazelor. Însă, ținând cont că nu există o metodă precisă de determinare a tipului golurilor de tensiune, din măsurători reale,

metodă care să respecte clasificarea ABC, se poate spune că metoda propusă este satisfăcătoare pentru analiza aplicațiilor ce vor fi prezentate în continuare.

În Fig.4.13 se prezintă grafic, diferențele (ΔU) dintre tensiunea de linie minimă înregistrată și tensiunile de linie minime teoretice calculate cu relațiile din Tabelul 4.8, ca funcție de timp, pentru cele două aplicații analizate anterior.

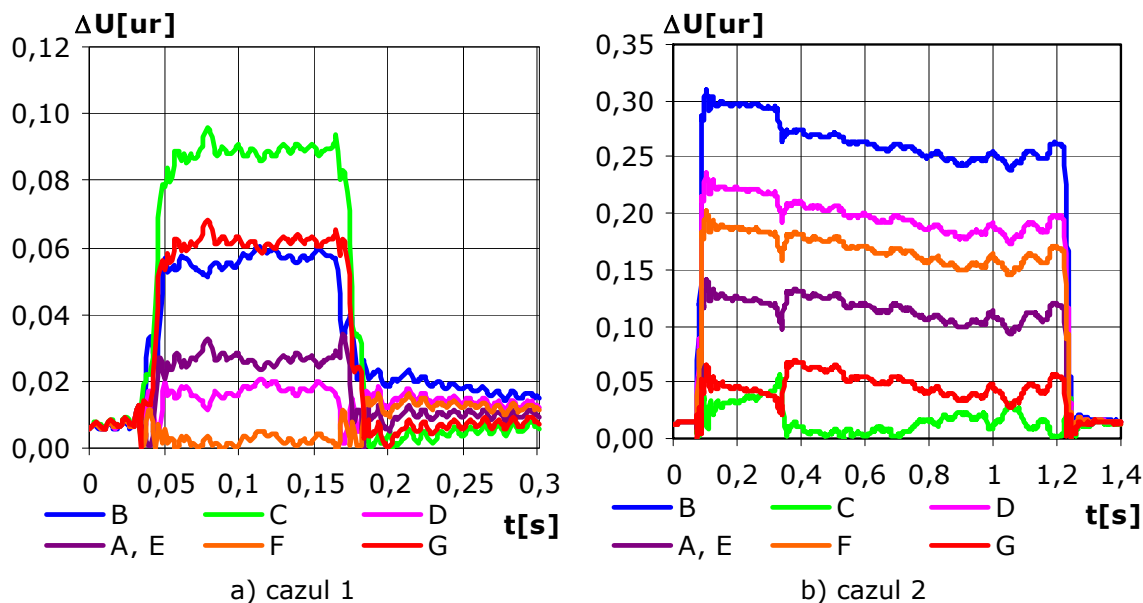


Fig.4.13. Determinarea golului de tensiune în prima etapă.

În Fig.4.13.a se observă pentru cazul 1, în urma parcurgerii primei etape a metodei dezvoltate, rezultă că golul de tensiune este de tipul F. Acest lucru este confirmat și de rezultatele obținute în urma comparației dintre algoritmi propuși de Leborgne și Bollen. În Fig.4.13.b se observă că pentru cazul al doilea, în urma parcurgerii primei etape a metodei dezvoltate, rezultă că ambele trepte ale golului de tensiune sunt de tipul C. Acest lucru conduce la aplicarea celei de-a doua etape care pornește de la premisa că golul de tensiune poate fi de tipul C sau G.

Dacă se notează cu 1-A, 2-B, 3-C, 4-D, 5-E, 6-F, 7-G, se poate reprezenta grafic tipul golului de tensiune determinat pentru fiecare moment de timp k dintr-o măsurătoare (Fig.4.14).

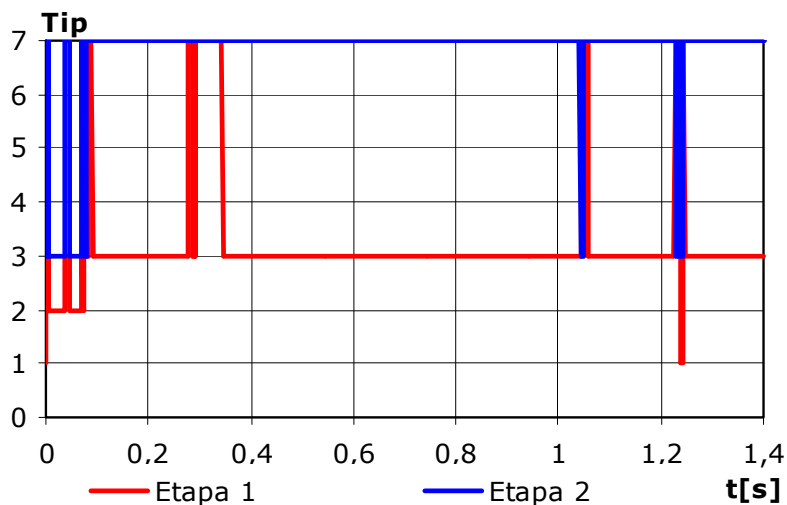


Fig.4.14. Determinarea golului de tensiune din a doua etapă.

Aplicând a doua etapă a metodei propuse se determină, tipul golului de tensiune ca și selecție între C și G, reprezentată grafic tot în Fig.4.14.

Din analiza graficelor de Fig.4.14, rezultă că în prima etapă s-a determinat tipul golului de tensiune ca fiind tipul C, pentru ambele trepte ale golului de tensiune. Aplicând a doua etapă a rezultat că golul de tensiune este de tipul G, pentru ambele trepte.

După determinarea tipului golului de tensiune, se poate determina amplitudinea golului de tensiune (h), cu relația corespunzătoare tipului G de gol de tensiune. Astfel:

- pentru cazul 1:
 - pentru prima treaptă: $h_1=0.84u.r.$ sau $h_1=84\%$;
- pentru cazul 2:
 - pentru prima treaptă: $h_1=0.58u.r.$ sau $h_1=58\%$;
 - pentru a doua treaptă: $h_2=0.65u.r.$ sau $h_2=65\%$.

Din compararea tensiunilor pe faze se determină că faza cea mai afectată pentru cazul 1 este faza S. Pentru cazul 2, există două faze mai afectate și anume R și S, lucru care se putea concluziona și din faptul că tensiunea de linie U_{RS} , avea cea mai mică valoare dintre tensiunile de linie.

În plus față de cazurile tratate în acest paragraf, în *Anexa II*, se mai prezintă câteva cazuri mai semnificative. Primele patru cazuri sunt preluate dintr-o altă bază de date, și ele reprezintă măsurători realizate în stația Săcălaz din județul Timiș, pe linia Săcălaz-Cărpiniș. În figurile din anexe, sunt prezentate pentru fiecare caz în parte, valorile efective ale tensiunilor pe faze și tipul golului obținut cu cele trei metode tratate, și anume Leborgne, Bollen, Metoda proprie.

Astfel, cazul 1 prezentat în Fig.A2.1 este un caz cu un gol de tensiune de tip D, faza mai afectată fiind faza T. Se observă, că toți cei trei algoritmi indică acest lucru.

Cazul 2 din Fig.A2.2 este un caz în care avem două goluri de tensiune care apar la interval de o secundă. Pentru primul gol de tensiune, se observă că în cazul metodei Leborgne (Fig.A2.2.b), grupul de valori se situează între tipul B și D, fiind destul de dificil luarea unei hotărâri în ceea ce privește tipul golului. Același lucru putem să îl constatăm și dacă luăm în considerare graficul ridicat conform metodei Bollen (Fig.A2.2.c). Din analiza primei etape a metodei proprii (Fig.A2.2.e) se observă că tipul golului este D. Pentru al doilea gol de tensiune se observă că metoda Leborgne (Fig.A2.2.b) indică tipul C, metoda Bollen (Fig.A2.2.d) tipul C sau E, iar metoda proprie la care se aplică ambele etape (Fig.A2.2.e,f) indică tipul golului ca fiind C.

Al treilea caz prezentat în Fig.A2.3, este de asemenea un caz cu două goluri de tensiune la un interval de o secundă. Acest caz este mai ușor de analizat, observându-se că pentru ambele goluri de tensiune, tipul golului este D. Toate cele trei metode indică acest lucru fără nici un dubiu.

Ultimul caz prezentat din această bază de date, este un caz de tip C (Fig.A2.4), lucru indicat destul de exact de metoda Leborgne (Fig.A2.4.b) și de metoda proprie (Fig.A2.4.d,e), cu precizarea că metoda Bollen (Fig.A2.4.c), nu face pe acea porțiune diferențierea dintre tipurile C și E.

În finalul *Anexei II*, mai sunt prezentate două cazuri din prima bază de date luată în considerare. În Fig.A2.5.a se prezintă un caz mai complicat, în care se observă că în prima etapă, cade tensiunea pe fazele R și S (mai accentuat pe faza R) obținându-se un gol bifazat de durată o secundă. După aceasta tensiunea pe faza S revine la normal, iar tensiune pe faza R crește la o valoare mai mare, dar totuși

valoare considerată gol de tensiune. După o secundă, tensiune pe faza S cade din nou până la o valoare aproximativ egală cu cea de pe faza R.

Astfel din analiza metodei Leborgne (Fig.A2.5.b) rezultă că primul gol de tensiune poate fi de tipul A sau E, al doilea gol de tensiune este de tipul F, iar în final al treilea gol de tensiune este de tipul G. Conform metodei Bollen (Fig.A2.5.c,d), rezultă că primul și al treilea gol de tensiune este de tipul G, iar al doilea este situat între tipul D și F cu o apropiere mai mare de tipul D. Aplicând metoda proprie rezultă din prima etapă (Fig.A2.5.e) că primul gol de tensiune este de tipul A sau E, al doilea este de tipul F și al treilea este de tipul G. Din a doua etapă (Fig.A2.5.f) rezultă că primul gol de tensiune este de tipul E și se confirmă că al treilea gol de tensiune este de tipul G.

Ultimul caz prezentat (Fig.A2.6) este un caz mai simplu care a fost luat în considerare pentru a arăta că există multe situații în care cele trei metode analizate oferă cu exactitate același rezultat.

În Anexa III se prezintă tabelar, o parte din rezultatele obținute în urma aplicării metodei propuse, precum și a celorlalte patru algoritme prezentate, pe baza de date avută la dispoziție.

O primă concluzie a analizei bazelor de date luate în considerare, conduce la determinarea particularităților zonelor în care au fost monitorizate. Astfel putem spune că în zona stației Mociur, predomină golurile de tensiune cu căderi de tensiune majore pe două faze, în timp ce în zona stației Săcălaz predomină golurile de tensiune cu cădere de tensiune majoră pe o singură fază.

În final, se poate observa că metodele de determinare a tipului golului de tensiune, existente în literatură, pot să se contradică în situații mai dificile. Totuși se observă că toate cele trei metode prezentate obțin rezultate corecte pentru situații în care avem cădere de tensiune pe o singură fază. Divergențele între metode apar în momentul în care se analizează goluri de tensiune cu căderi de tensiune pe două faze. Practic, la această problemă se observă marea contribuție adusă de metoda proprie care a fost dezvoltată în acest capitol.

4.5. Concluzii și contribuții

Acest capitol abordează problema clasificării și caracterizării golurilor de tensiune. În prima parte a capitolului se prezintă modul de reglementare a limitelor admisibile pentru mărimile caracteristice golurilor de tensiune în diverse standarde internaționale, de unde reiese că problema standardizării în domeniul golurilor de tensiune este una foarte delicată. Ca și o părere personală, cea mai bună caracterizare este dată de standardul IEC 61000-4-30, care precizează că în funcție de problema analizată, se pot stabili diferite limite pentru mărimile care caracterizează golurile de tensiune.

O a doua problemă tratată este aceea de clasificare a golurilor de tensiune. Din literatura de specialitate reiese că există o multitudine de metode de clasificare a golurilor de tensiune, dintre care s-au evidențiat Clasificarea ABC și Clasificarea după componentele simetrice. Din studiile efectuate s-a ajuns la concluzia de a se păstra ambele metode, deoarece clasificarea ABC este o clasificare realizată teoretic din analiza propagării curenților de scurtcircuit în rețelele electrice, obținută prin reducerea rețelei la un punct comun de conexiune (PCC), iar clasificarea după componentelor simetrice este o clasificare care ține cont de nesimetria sistemului de tensiuni, și ea se bazează pe descompunerea sistemului trifazat nesimetric în componente nesimetrice.

Clasificarea ABC este o clasificare care permite o determinare mai simplă a propagării golurilor de tensiune în sistemul electroenergetic. Practic dacă se reduce rețeaua electrică la punctul de defect, se poate obține curentul de scurtcircuit și ulterior, cu ajutorul său, se poate determina valoarea tensiunii în orice punct al rețelei electrice.

Clasificarea după metoda componentelor simetrice, este o clasificare care pornește de la determinarea curentului de scurtcircuit cu metoda componentelor simetrice. În continuare, prin utilizarea acestei metode se poate determina tipul golului de tensiune în diferite puncte ale rețelei electrice, ca funcție de doi factori denumiți *tensiune caracteristică* și *factor de nesimetrie*. Clasificarea se pretează mult mai bine la analiza golurilor de tensiune reale, dar este mai dificil de utilizat în analiza propagării lor în rețeaua electrică.

Următoarea problemă, studiată a fost aceea de a găsi metodele practice de determinare a golurilor de tensiune din măsurători reale. Și în această problemă, s-au propus o multitudine de metode, dintre care s-au evidențiat cele patru prezentate în această lucrare:

- metoda componentelor simetrice, care determină tipul golului de tensiune, conform clasificării după metoda componentelor simetrice; metoda pornește de la descompunerea tensiunilor de fază în componente simetrice, iar apoi se determină unghiul dintre tensiunile de secvență directă și inversă cu ajutorul cărora se obține tipul golului de tensiune;
- metoda celor șase faze, este o metodă care determină tipul golului de tensiune conform clasificării după componentele simetrice; ea pornește de la calcularea tensiunilor efective de fază și de linie, cu precizarea că tensiunile de linie sunt reduse cu coeficientul $\sqrt{3}$ pentru a putea fi comparate cu tensiunile de fază, iar cea mai mică dintre aceste șase tensiuni ne dă tipul golului de tensiune;
- metoda grafică a lui Leborgne, determină tipul golului de tensiune conform clasificării ABC, prin compararea tensiunii minime de linie determinate teoretic, cu tensiunea minimă de linie obținută din achiziția curbelor de tensiune (ori se achiziționează tensiunea de linie, ori se calculează din tensiunile de fază achiziționate); metoda este foarte simplistă însă este supusă erorilor, în special datorită faptului că pentru tipul A și E avem aceiași valoare pentru tensiunea de linie teoretică;
- metoda grafică a lui Bollen, determină tipul golului de tensiune conform clasificării ABC, prin compararea tensiunilor minime și maxime de fază obținute din prelucrarea curbelor tensiunilor înregistrate; metoda este mai complicată și totuși are situații în care introduce erori.

Din analiza acestor metode, rezultă că o clasificare după metoda componentelor simetrice este mult mai potrivită pentru determinarea golului de tensiune din înregistrări de curbe de tensiune, totuși ea nu poate fi utilizată cu succes decât în scopuri statistice.

În finalul capitolului se propune un algoritm nou, îmbunătățit, pentru determinarea tipului golurilor de tensiune conform clasificării ABC, pornind de la măsurători reale. Acest algoritm a fost aplicat pe bazele de date aflate la dispoziție, iar rezultatele obținute au fost comparate cu rezultatele obținute prin aplicarea metodelor grafice propuse de Leborgne și Bollen. Pentru confirmarea corectitudinii algoritmului, au fost luate în considerare măsurători din diferite zone ale rețelei electrice (Bihor, Arad, Timiș, Caraș-Severin), iar în această lucrare au fost prezentate cazuri mai elocvente din două zone geografice: Caraș-Severin și Timiș.

Contribuțiile personale din acest capitol sunt:

- analiza prevederilor standardelor internaționale privind limitele mărimilor caracteristice ale golurilor de tensiune;
- studiul și selectarea critică a metodelor de clasificare a golurilor de tensiune, precum și a metodelor de determinare a caracteristicilor golurilor de tensiune obținute din achiziționarea curbelor de tensiune cu diferite tipuri de echipamente de monitorizare;
- compararea metodelor existente în literatură pentru a arăta necesitatea continuării studiilor pe această temă;
- dezvoltarea unei metode proprii și pe baza ei a unui *algoritm original* de determinare a tipului golului de tensiune conform clasificării ABC. Acest algoritm este cu atât mai important cu cât în studiile din domeniu nu este prezentat un algoritm concret pentru determinarea tipului golurilor de tensiune conform acestei clasificări;
- compararea rezultatelor obținute cu acest algoritm, cu rezultatele obținute cu celelalte metode prezentate în acest capitol, ceea ce a condus la validarea procedurii și algoritmului dezvoltat.

5. CONSIDERAREA CONSUMATORILOR COMPLECȘI ÎN ANALIZA REGIMURILOR DE GOL DE TENSIUNE

Capitolul prezintă o metodă de considerare a consumatorilor complecși, pornind de la împărțirea acestora în două componente: statică și dinamică. Pentru a obține o mai bună echivalare a componentei dinamice, aceasta va fi considerată ca fiind de structura unui motor electric de inducție echivalent. Scopul capitolului este de a realiza un model matematic pentru analiza comportării consumatorilor complecși la perturbații de tensiune în general, respectiv la goluri de tensiune în particular. Pe baza modelului matematic se dezvoltă un algoritm care ține cont și de faptul că perturbația care poate afecta consumatorul complex poate produce o nesimetrie a sistemului de tensiuni. Verificarea modelului matematic se face prin simulare MatLab. Tot în acest capitol este prezentată o aplicație care utilizează modelul matematic pentru identificarea parametrilor consumatorilor echivalenți.

5.1. Aspecte generale

În general, studiile privind comportarea consumatorilor în regim de gol de tensiune s-au concentrat la analiza individuală a fiecărei categorii de consumatori. Dintre acestea majoritatea studiilor au fost orientate spre consumatorii cei mai sensibili la acest tip de perturbație cum ar fi consumatorii din domeniul IT. Totuși o categorie de studii au fost orientate spre consumatori clasici cum ar fi motoarele de inducție [Das1990], [Bollen1996], [Corcoles1999], [Sannino2001], [Gomez2002], [Rendroyoko2002], [Bollen2003b], [Guasch2004], [Zlomek2005], [Leiria2006], [Tourn2006], [Pedra2007], [Farahbakhsh2007], [Milanovic2008a] [Milanovic2008b].

5.1.1. Structura de principiu a consumatorilor complecși considerată pentru regimuri dinamice

Din punctul de vedere al comportării în regimuri dinamice a diversilor consumatori individuali din structura generală a unui consumator complex (CC), pot fi distinse două categorii de consumatori componenți, și anume:

- consumatori rotativi;
- consumatori statici,

a căror pondere r și respectiv, $(1-r)$ în CC poate fi estimată statistic, pe baza datelor din teren. Având în vedere că ponderile acestor componente în puterea activă și reactivă a CC pot fi diferite, acestea se vor nota în continuare cu r_p și r_q (Fig.5.1).

Dacă ultima categorie de consumatori, poate fi reprezentată corect prin caracteristici statice (CS) de putere funcție de tensiune în toate regimurile dinamice ale SEE, prima categorie, având elemente în mișcare și circuite magnetice importante, deci elemente inerțiale, implică reprezentarea lor prin caracteristici dinamice (CD).

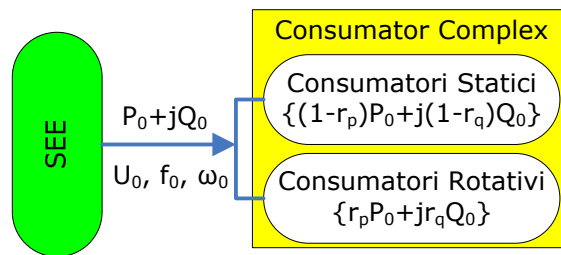


Fig.5.1. Structura de principiu considerată pentru CC în regim staționar de referință.

Deoarece, nu se pune problema reprezentării distincte a fiecărui consumator component al CC, se utilizează practic, un echivalent al componentelor de consum și al rețelei electrice de distribuție proprie acestuia.

Este rațional ca acest echivalent să conțină două componente, una corespunzătoare consumatorilor statici, denumită în continuare, *componenta statică* și una corespunzătoare consumatorilor rotativi, denumită *componenta rotativă* (Fig.5.1).

5.1.2. Reprezentarea componentei statice

Pentru *componenta statică* a consumatorului echivalent, se poate adopta orice formă de CS. Totuși trei forme de reprezentare sunt uzuale pentru componenta statică a CC [Nemeș1998]:

a) Putere constantă:

$$\begin{aligned} P_{st} &= (1 - r_p) \cdot P_0 \\ Q_{st} &= (1 - r_q) \cdot Q_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

unde P_0 , Q_0 , U_0 și ω_0 reprezintă mărimile caracteristice (MC) și respectiv, mărimile de sistem (MS) ale CC, în regimul staționar de referință, considerat cunoscut.

b) Admitanță constantă:

$$\underline{Y}_{st} = G_{st} - j \cdot B_{st} \quad (5.2)$$

unde:

$$\begin{aligned} G_{st} &= \frac{1}{R_p} = (1 - r_p) \cdot \frac{P_0}{U_0^2} \\ B_{st} &= \frac{1}{(\omega_0 \cdot L_p)} = (1 - r_q) \cdot \frac{Q_0}{U_0^2} \end{aligned} \quad (5.3)$$

R_p și L_p sunt rezistența și inductivitatea corespunzătoare, conectate în paralel în nodul de racord.

c) CS liniarizate funcție de tensiune:

$$\begin{aligned} P_{st} &= (1 + p_U \cdot \Delta U_r) \cdot (1 - r_p) \cdot P_0 \\ Q_{st} &= (1 + q_U \cdot \Delta U_r) \cdot (1 - r_q) \cdot Q_0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

unde p_U și q_U sunt efectele de reglaj exprimate în u.r.

Referitor la aceste forme de reprezentare uzuală a componentei statice din structura CC, în regimuri tranzitorii se pot face următoarele *observații*:

a) Reprezentarea prin putere constantă este cea mai simplă formă, din punctul de vedere al includerii sale în modelul matematic (MM) al sistemului, dar și

cea mai puțin realistă. Din punctul de vedere al rezolvării (convergenței) regimurilor, acest mod de reprezentare poate genera dificultăți, convergență lentă sau chiar divergență, în cazurile cu tensiuni în noduri foarte coborâte. (curentul absorbit devine foarte mare, pentru a asigura puterea constantă și deci căderi de tensiuni mari ce accentuează reducerea tensiunii).

b) Reprezentarea prin admitanță constantă este mai apropiată de comportarea reală a componentei statice (reprezentată de consumatori rezistivi, elemente de rețea, etc.) și nu creează dificultăți privind convergența soluțiilor chiar în regimurile tranzitorii când tensiunea poate avea valori foarte reduse. De asemenea permite considerarea și a variației frecvenței tensiunii la borne prin considerarea susceptanței de forma:

$$B_{st} = \frac{1}{(\omega \cdot Lp)} = \left[(1 - r_q) \cdot \frac{Q_0}{U_0^2} \right] \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \quad (5.5)$$

În acest caz, sarcina statică este dependentă atât de tensiunea la borne cât și de frecvența acesteia, conform CS de forma:

$$\begin{aligned} P_r &= U_r^2 \quad u.r. \\ Q_r &= U_r^2 \cdot \omega_r^{-1} \quad u.r. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Reprezentarea componentei statice, prin admitanță constantă permite includerea sa direct în matricea de admitanță nodală a sistemului.

c) Reprezentarea prin CS liniarizate, permite reprezentarea cea mai riguroasă a acestei componente, însă implică cunoașterea valorilor efectelor de reglaj (exprimate în u.r.) ale componentei statice de consum. Se poate remarca faptul că celelalte două moduri de reprezentare sunt forme particulare ale acesteia. Astfel, dacă se consideră: $p_U=q_U=0$ se obține reprezentarea prin putere constantă, iar dacă se admite $p_U=q_U=2$, se obține reprezentarea de tip admitanță constantă.

În concluzie, se recomandă reprezentarea componentei statice prin CS liniarizate, dacă se dispune de informații privind parametrii acestora. În caz contrar, reprezentarea prin admitanță constantă inclusă în matricea de admitanță nodală a sistemului, este preferabilă, atât din punctul de vedere al fidelității cât și al convergenței soluțiilor regimurilor.

5.1.3. Reprezentarea componentei rotative

Pentru *componenta rotativă*, se poate adopta reprezentarea prin CS, dacă dinamica sistemului presupune oscilații suficient de lente care pot fi urmărite fidel și de consumatorii rotativi ai CC.

Reprezentarea general valabilă pentru componenta rotativă a CC, în orice regim dinamic, este însă prin CD, în care intervin derivatele MS și variabila timp.

Aceste CD, sunt reprezentate de sisteme de ecuații algebrice și diferențiale ce pot avea diverse forme și dimensiuni. Având însă în vedere ponderea deosebit de mare a motoarelor de inducție în cadrul acestei componente a CC este rațional să reprezentăm această componentă printr-un motor de inducție (MI) echivalent.

CD ale MI echivalent, pot fi reprezentate în forma generală, printr-un sistem de ecuații diferențiale (de stare) și algebrice (de ieșire):

$$\frac{dx}{dt} = f_x(u, x, p) \quad (5.7)$$

$$\underline{C} = f_y(\underline{u}, \underline{x}, \underline{p}) \quad (5.8)$$

unde vectorii \underline{u} și \underline{C} reprezintă *Mărimile de Sistem (MS)*, de regulă U și ω , și respectiv *Mărimile Caracteristice (MC)*, de regulă P și Q , iar \underline{x} , mărimile de stare, inerțiale, și în general, nemăsurabile, ale MI echivalent. Vectorul \underline{p} este vectorul parametrilor MI echivalent.

În consecință, CD ale componentei rotative a CC vor avea forma și dimensiunile CD (MM) ale unui MI de putere medie (această categorie fiind predominantă în structura consumatorilor complecși).

În baza acestor considerente rezultă că reprezentarea (Fig.5.2) convenabilă a CC pentru analiza regimurilor dinamice constă într-un element de tip *admitanță constantă*, căreia să i se atașeze consumul absorbit de componenta statică a CC:

$$P_{st} + j \cdot Q_{st} = [1 - r_p] \cdot P_0 + j \cdot [1 - r_q] \cdot Q_0 \quad (5.9)$$

și un element, de tip *motor de inducție* care să preia restul consumului:

$$P_{rt} + j \cdot Q_{rt} = r_p \cdot P_0 + j \cdot r_q \cdot Q_0 \quad (5.10)$$

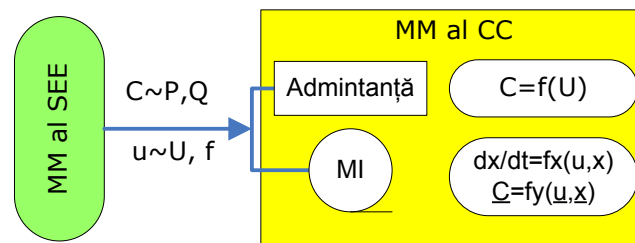


Fig.5.2. Structura recomandată pentru MM al CC.

Reprezentarea și includerea în MM al sistemelor electroenergetice, a componentei statice a CC, reprezentate conform celor de mai sus, printr-o admitanță ce se poate include în matricea de admitanță nodală, nu ridică absolut nici o problemă. În continuare, vom avea în vedere doar componenta rotativă.

Pentru aceasta se vor deduce CD ale MI echivalent, considerând cunoscuți parametrii săi. Formele uzuale de reprezentare prin CD, ale MI sunt: caracteristici neliniare; liniarizate; și funcții de transfer liniare. Având în vedere amplitudinea golurilor de tensiune, mai mare de 10%, reprezentarea componentei rotative a CC se impune a se face prin CD neliniare de forma generală (5.7) și (5.8). În continuare, în cadrul acestui capitol, se urmărește dezvoltarea acestor forme de CD pornind de la ecuațiile de funcționare ale MI, pe care le reluăm în următorul paragraf.

5.2. MM al MI echivalent componentei rotative din CC

Literatura de specialitate oferă o mare diversitate de MM pentru MI, determinată de:

- sistemul de coordonate considerat;
- lista mărimilor de intrare și de ieșire;
- ipotezele și convențiile de semn adoptate.

În consecință, se impune parcurgerea tuturor etapelor de construire a CD, dacă se dorește utilizarea acestora într-un MM de ansamblu al sistemului

electroenergetic, începând cu definirea ipotezelor simplificatoare și convenții de semn [Moga1990], cu stabilirea listei de mărimi de intrare și ieșire, etc.

În cadrul prezentului paragraf se vor deduce ecuațiile de funcționare pentru MI echivalent, considerat în teoria celor două axe, ca punct de plecare pentru construirea CD ale acestuia în paragrafele următoare.

5.2.1. Ipoteze simplificatoare și convenții de semn adoptate

a) *Ipoteze referitoare la aspectele constructive ale MI:*

Se consideră MI cu:

- întrefier uniform;
- trei faze statorice, amplasate simetric în stator;
- bobinele sau barele rotorice amplasate de asemenea simetric, astfel încât să producă în întrefier, tensiuni magnetomotoare sinusoidale;
- mașina are o singură pereche de poli plini;

b) *Ipoteze referitoare la parametrii electrici ai circuitului echivalent:*

- inductanțele de dispersie $L_{\sigma 1}$ și $L'_{\sigma 2}$, ale înfășurărilor statorică și respectiv, rotorică, redusă la nivelul de tensiune statoric, se consideră egale;
- se neglijează saturația inductanței de magnetizare, ceea ce înseamnă $L_m = L_{m0}$, considerată constantă în raport cu tensiunea;
- pierderile de putere activă în miezul feromagnetic se neglijează în MM al MI, deși ele pot fi reprezentate printr-un element transversal, R_{fe} ce poate fi inclus în componenta statică de consum și deci în matricea nodală;
- se neglijează curenții turbionari și histereza magnetică.

c) *Ipoteze referitoare la scrierea ecuațiilor de funcționare ale MI:*

- se neglijează fenomenele tranzitorii statorice (termenii $d\psi_d/dt$ și $d\psi_q/dt$).

Din punct de vedere fizic, aceasta implică neglijarea componentei din curenții statorici generate de variația în timp a fluxului statoric și care tinde să se opună modificării înălțurii statorice. Importanța acestei componente este pregnantă totuși, în regimurile de pornire sau cu oscilații foarte mari ale MS, când turația rotorului are valori reduse;

- pierderile mecanice (prin frecări și ventilație) se consideră incluse în puterea mecanică rezistentă (a mecanismului antrenat).

d) *Convenții de semn (parțial exemplificate în Fig.5.3.):*

- puterea activă și reactivă inductivă se consideră pozitivă dacă este absorbită de MI;
- sensul de rotație pozitiv este sensul dextrogir, corespunzător sensului natural de rotație al mașinilor rotative;
- sensul pozitiv al unghiurilor este sensul pozitiv trigonometric, levogir;
- axa transversală q se consideră defazată cu $\pi/2$ rad. înaintea axei d , în sensul de rotație admis (dextrogir);
- ca origine a unghiurilor se consideră axa fazei statorice 1;
- pentru scrierea ecuațiilor tensiunilor se adoptă convenția de la receptor:

$$u = R \cdot I + \frac{d\psi}{dt} \quad (5.11)$$

unde $d\psi/dt$ este tensiunea contraelectromotoare a fluxului ψ ;

- tensiunea se consideră pozitivă dacă este îndreptată de la punctul cu potențial mai ridicat spre cel cu potențial mai coborât;
- sensul pozitiv al curentului este sensul axei căreia îi este atașat;

- sensul pozitiv al fluxului magnetic se asociază cu sensul pozitiv al curentului care străbate înfășurarea, conform regulii burghiului drept;

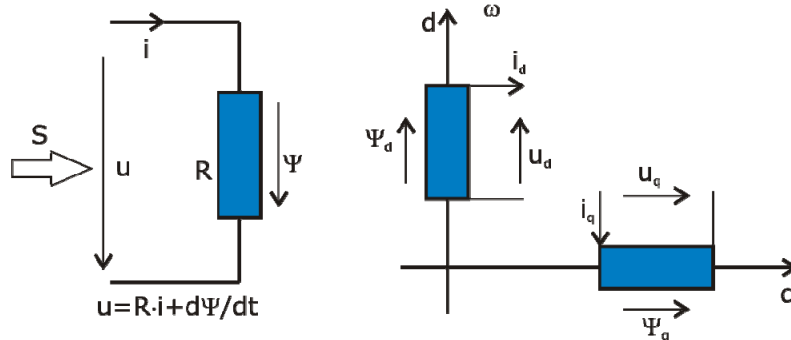


Fig.5.3. Representarea unor convenții de semn adoptate.

Notații

- toate mărimile care intervin în continuare sunt mărimi exprimate în u.r., cu mărimi de bază reprezentate de mărimile din regimul staționar de referință, denumite și mărimi nominale;
- mărimile aferente rotorului vor fi marcate cu apostroful ` (prim).

5.2.2. Ecuațiile de funcționare ale mașinii de inducție (MI)

Mașina de inducție reală.

Considerând ipotezele și convențiile de semn adoptate pentru MI, schema electrică a acesteia este reprezentată în Fig.5.4, unde axele fazelor statorice și rotorice sunt caracterizate de unghiurile:

$$\theta_\lambda = 2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot [\lambda - 1] ; \quad \theta'_\lambda = \theta'_\lambda + 2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot [\lambda - 1] ; \quad \lambda = 1, 2, 3 \quad (5.12)$$

S-a notat cu ω pulsația tensiunii statorice, (considerată MS), care în regim permanent este ω_0 , și cu ω' pulsația rotorului.

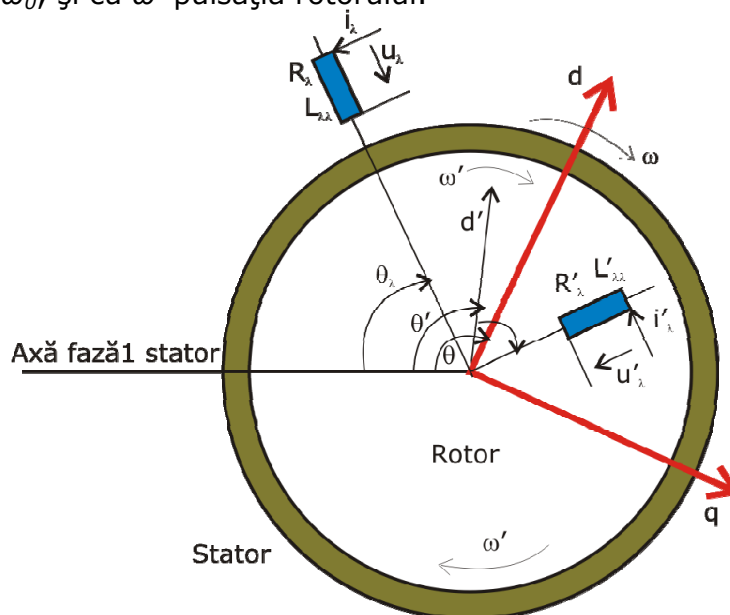


Fig.5.4. Mașina de inducție reală.

Deoarece $\omega' < \omega_0$, între rotor și câmpul magnetic statoric, există o alunecare s (slip):

$$s = \frac{(\omega - \omega')}{\omega} \quad (5.13)$$

În consecință, axa d' rotorică se va afla în urma axei statorice d , cu un unghi: $\theta - \theta'$.

Ecuțiile de funcționare ale mașinii reale, considerând parametrii de fază, convențiile și ipotezele prezentate anterior sunt [Dordea1977]:

$$\begin{aligned} u_\lambda &= R_\lambda \cdot i_\lambda + \frac{d\Psi_\lambda}{dt} \\ u'_\lambda &= R'_\lambda \cdot i'_\lambda + \frac{d\Psi'_\lambda}{dt} \\ \Psi_\lambda &= \sum L_{\lambda v} \cdot i_v + \sum L_{\lambda v'} \cdot i'_v \\ \Psi'_\lambda &= \sum L_{\lambda' v} \cdot i_v + \sum L_{\lambda' v'} \cdot i'_v \\ C_e &= \frac{\partial \left\{ \frac{1}{2} \cdot \sum i_\lambda \cdot \Psi_\lambda + \frac{1}{2} \cdot \sum i'_\lambda \cdot \Psi'_\lambda \right\}}{\partial \theta'} \\ \frac{d\theta'}{dt} &= \omega' \\ J \cdot \frac{d\omega'}{dt} &= C_e - C_m \end{aligned} \quad (5.14)$$

Pentru λ și $v=1,2,3$ unde:

$L_{\lambda v'}$ – este inductivitatea mutuală între înfășurarea statorică λ și cea rotorică v' ;

$L_{\lambda\lambda}$ – este inductivitatea proprie a înfășurării statorice λ ;

L_{vv} – este inductivitatea proprie a înfășurării rotorice v ;

Rezolvarea sistemului de ecuații (5.14) permite determinarea variației în timp a curenților, statorici de fază, a turației rotorice și a cuplului electric dezvoltat de mașină, presupunând cunoscuți parametrii mașinii (R , L , T_m , C_m) și mărimile de sistem: (U , ω).

Deoarece în expresiile inductivităților mutuale între stator și rotor intervine poziția rotorului față de stator, exprimată prin unghiul θ' , dependentă de timp, rezultă că acestea nu sunt constante în timp. Pentru a evita acest lucru în practica analizei regimurilor tranzitorii, aproape în exclusivitate, se utilizează o mașină echivalentă din punct de vedere energetic cu mașina reală dată. Această mașină echivalentă a fost concepută astfel încât parametrii săi (este vorba de inductivități) să nu mai depindă de poziția rotorică și deci să fie constanți în timp.

Mașina echivalentă.

Mașina de inducție echivalentă a MI real considerat în regim sinusoidal trifazat simetric, este caracterizată prin următoarele:

- două înfășurări statorice, repartizate sinusoidal, mobile față de stator având axele suprapuse peste un sistem de axe rectangulare, d, q , ce se rotesc cu turația sincronă ω ;
- două înfășurări rotorice similare cu cele statorice, amplasate în aceleași axe d, q ;
- același întrefier, același moment de inerție și același număr de perechi de poli.

Aceste ecuații sunt [Dordea1977]:

ecuațiile statorice:

$$\begin{aligned}
 u_d &= R \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega \\
 u_q &= R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \omega
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

ecuațiile rotorice:

$$\begin{aligned}
 u'_d &= R' \cdot i'_d + \frac{d\Psi'_d}{dt} - s \cdot \Psi'_q \cdot \omega \\
 u'_q &= R' \cdot i'_q + \frac{d\Psi'_q}{dt} - s \cdot \Psi'_d \cdot \omega
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

ecuațiile Maxwell:

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= L_{dd} \cdot i_d + L_{dd'} \cdot i'_d \\
 \Psi_q &= L_{qq} \cdot i_q + L_{qq'} \cdot i'_q \\
 \Psi'_d &= L_{d'd} \cdot i_d + L_{d'd'} \cdot i'_d \\
 \Psi'_q &= L_{q'q} \cdot i_q + L_{q'q'} \cdot i'_q
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

ecuațiile de mișcare rotor:

$$\begin{aligned}
 C_e &= \Psi_q \cdot i'_d - \Psi_d \cdot i'_q \\
 \omega' &= \omega \cdot (1 - s) \\
 J \cdot \frac{d\omega'}{dt} &= C_e - C_m
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

unde J este momentul de inerție al maselor în mișcare.

În Fig.5.5. se prezintă mașina de inducție echivalentă a MI real.

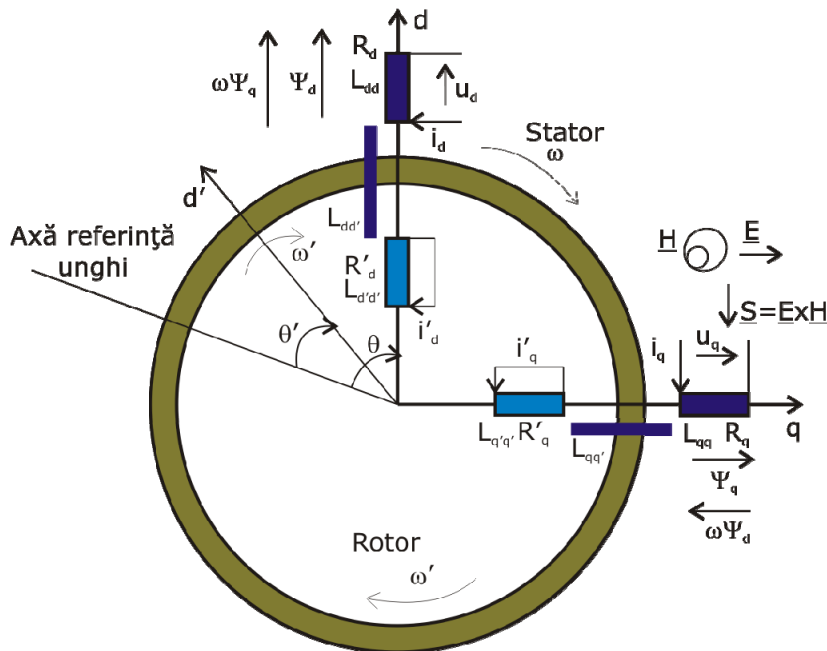


Fig.5.5. Mașina de inducție echivalentă.

Ecuțiile mașinii echivalente de mai sus, pot fi justificate având în vedere legile circuitului electric, și faptul că fluxurile statorice ale mașinii echivalente Ψ_d și Ψ_q se rotesc cu pulsația ω față de înfășurările statorice ale mașinii reale. De acest

lucru se poate ține cont prin introducerea unor tensiuni electromotoare (t.e.m.) proporționale cu $\omega\Psi$ și defazate cu $\pi/2$ în urma fluxului. Deci Ψ_q va genera o t.e.m., $\omega\Psi_q$ după direcția axei d , iar Ψ_d va genera o t.e.m., $\omega\Psi_d$ după direcția axei q , Fig.5.5. Aplicând legile circuitului electric celor două înfășurări statorice se obțin ecuațiile statorice (5.15). Aceeași justificare poate fi considerată și în cazul ecuațiilor rotorice. Aici însă, termenul suplimentar este datorat vitezei unghiulare relative între înfășurările rotorice ale mașinii reale și a celei echivalente:

$$\omega - \omega' = s \cdot \omega \quad (5.19)$$

deoarece s-a presupus că înfășurarea rotorică se rotește cu pulsația ω a câmpului magnetic statoric.

Aceasta va determina tensiunile electromotoare $s \cdot \Psi'_d \cdot \omega$ și $s \cdot \Psi'_q \cdot \omega$ după axele $-q$ și respectiv d , decalate cu 90 grade în urma fluxurilor corespunzătoare.

5.2.3. Precizări referitoare la parametrii ecuațiilor mașinii echivalente

Considerând mașina cu poli plini, inductivitățile proprii și mutuale, după cele două axe, d și q ale înfășurărilor statorică și rotorică sunt egale, și în consecință se pot introduce următoarele notații:

$$L_{dd} = L_{qq} = L_{\sigma s} ; L'_{dd} = L'_{qq} = L_{\sigma r} ; L_{d'd} = L_{q'q} = L_m \quad (5.20)$$

Admițând și inductivitățile de dispersie (reduse la același nivel de tensiune) egale (ipoteza f.) și având în vedere:

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma r} \quad (5.21)$$

rezultă că:

$$L_s = L_m + L_{\sigma} \quad (5.22)$$

Din considerente legate de condițiile de echivalență, rezultă următoarele relații între rezistențele înfășurărilor acestora:

$$\begin{aligned} R_d = R_q = R &= \frac{2}{3} \cdot R_1 \\ R'_d = R'_q = R' &= \frac{2}{3} \cdot R'_2 \end{aligned} \quad (5.23)$$

unde:

R_1 și R'_2 sunt rezistențele înfășurărilor statorică și respectiv rotorică considerată la nivelul de tensiune al statorului ale mașinii reale;

R și R' rezistențele corespunzătoare ale mașinii echivalente.

Dacă se exprimă rezistențele în u.r.n. atunci dispar coeficienții $2/3$, din relațiile de mai sus.

5.3. CD neliniare ale MI echivalent din CC

5.3.1. Aspecte generale

Pornind de la ecuațiile de funcționare ale MI scrise în teoria celor două axe, prezentate anterior, se va deduce în continuare, MM neliniar, intrare-stare-ieșire al acestuia, format din sistemul ecuațiilor de stare și al celor de ieșire:

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = f_x(\underline{x}, \underline{u}) \quad (5.24)$$

$$\underline{y} = f_y(\underline{x}, \underline{u}) \quad (5.25)$$

unde:

\underline{x} - este vectorul mărimilor de stare: $\underline{x} = [U_{ed} \ U_{eq} \ s]^t$;

\underline{u} - este vectorul mărimilor de intrare (MS): $\underline{u} = [U \ \omega]^t$;

\underline{y} - este vectorul mărimilor de ieșire: $\underline{y} = [P \ Q]^t$.

Pentru ca acest MM să reprezinte CD, vectorii \underline{u} și \underline{y} trebuie să reprezinte tocmai mărimile de sistem, respectiv mărimile caracteristice, așa cum sunt precizate mai sus.

În toate ecuațiile de mai sus intervin și parametrii MI echivalent, considerați cunoscuți:

$$p^t = [L_s \ R \ L_m \ L' \ T'_{do} \ T \ K_m \ \beta] \quad (5.26)$$

Cuplul mecanic, deși este o mărime de intrare pentru MM al MI, îl vom considera totuși ca o mărime internă, similară cu cuplul electric, valoarea sa fiind determinată de turația rotorică. Acest lucru este impus de faptul că dorim să reprezentăm MI prin MM care să reflecte răspunsul său la modificarea doar a MS, nu și la alte tipuri de intrări (perturbații). În plus, prin identificare este posibilă cunoașterea parametrilor K_m și β ai cuplului mecanic și deci considerarea lui în acest mod.

În vederea construirii CD ale MI se vor parcurge, în continuare, următoarele etape:

- se vor aranja ecuațiile satorice astfel încât să putem reprezenta MI printr-un circuit electric echivalent;
- considerând vectorul mărimilor de stare \underline{x} , definit mai sus, se va elabora sistemul de ecuații de stare pornind de la ecuațiile înfășurărilor rotorice și ecuația de mișcare a rotorului;
- se vor deduce sistemul de ecuații algebrice de ieșire care să stabilească legătura între vectorul mărimilor caracteristice \underline{C} și cel al mărimilor de sistem \underline{u} .

5.3.2. Ecuațiile satorice

Neglijând termenii $d\Psi_d/dt$ și $d\Psi_q/dt$ din ecuațiile satorice (5.15) și introducând, doar pentru simplificarea scrierii, notațiile:

$$X_s = \omega \cdot L_s ; \ X_r = \omega \cdot L_r ; \ X_m = \omega \cdot L_m \quad (5.27)$$

ecuațiile (5.15) și (5.16) devin:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - \Psi_q \cdot \omega \\ u_q &= R \cdot i_q - \Psi_d \cdot \omega \end{aligned} \quad (5.28)$$

$$\begin{aligned} \omega \cdot \Psi_d &= X_s \cdot i_d + X_m \cdot i'_d \\ \omega \cdot \Psi_q &= X_s \cdot i_q + X_m \cdot i'_q \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \omega \cdot \Psi'_d &= X_m \cdot i_d + X_r \cdot i'_d \\ \omega \cdot \Psi'_q &= X_m \cdot i_q + X_r \cdot i'_q \end{aligned} \quad (5.30)$$

Înlocuind fluxurile statorice Ψ_d și Ψ_q din (5.28) cu expresiile lor (5.29) rezultă:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - X_s \cdot i_q - X_m \cdot i'_q \\ u_q &= R \cdot i_q - X_s \cdot i_d - X_m \cdot i'_d \end{aligned} \quad (5.31)$$

Din (5.30) rezultă expresiile curenților rotorici:

$$\begin{aligned} i'_d &= \frac{[\omega \cdot \Psi'_d - X_m \cdot i_d]}{X_r} \\ i'_q &= \frac{[\omega \cdot \Psi'_q - X_m \cdot i_q]}{X_r} \end{aligned} \quad (5.32)$$

care introduse în (5.31) ne dau ecuațiile statorice dependente doar de curenții statorici și fluxurile rotorice:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - X_s \cdot i_q - \frac{X_m}{X_r} \cdot [\omega \cdot \Psi'_q - X_m \cdot i_q] \\ u_q &= R \cdot i_q - X_s \cdot i_d - \frac{X_m}{X_r} \cdot [\omega \cdot \Psi'_d - X_m \cdot i_d] \end{aligned} \quad (5.33)$$

care rearanjate astfel încât să se evidențieze t.e.m. generate de fluxuri devin:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - i_q \cdot \left[X_s - \frac{X_m^2}{X_r} \right] - \left[\frac{X_m}{X_r} \cdot \omega \cdot \Psi'_q \right] \\ u_q &= R \cdot i_q - i_d \cdot \left[X_s - \frac{X_m^2}{X_r} \right] - \left[\frac{X_m}{X_r} \cdot \omega \cdot \Psi'_d \right] \end{aligned} \quad (5.34)$$

Deoarece $\omega\Psi$ este rezultatul derivatei $d\Psi/dt = \Psi d\theta/dt$, acesta reprezintă o t.e.m., defazată în urma cu $\pi/2$ față de fazorul fluxului.

$$u'_e = -\omega\Psi \quad (5.35)$$

În consecință, produsele $\omega \cdot \Psi'_d$ și $\omega \cdot \Psi'_q$ pot fi înlocuite cu t.e.m. induse, exprimate în volți sau u.r., mai familiare inginerilor, și care vor permite apoi reprezentarea MI prin scheme electrice echivalente.

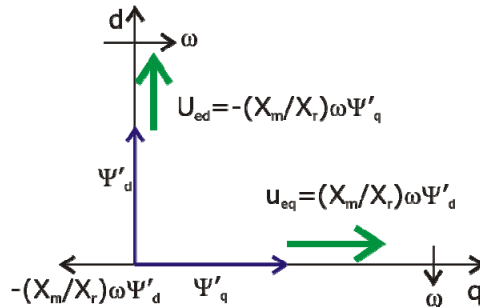


Fig.5.6. Definiția t.e.m. u_{ed} și u_{eq} .

Pe baza acestor considerente se introduc următoarele notații:

$$\begin{aligned}
 u_{ed} &= -\frac{X_m}{X_r} \cdot \omega \cdot \Psi'_q \\
 u_{eq} &= \frac{X_m}{X_r} \cdot \omega \cdot \Psi'_d
 \end{aligned}
 \tag{5.36}$$

prin care se înlocuiesc fluxurile rotorice cu t.e.m. echivalente, u_{ed} și u_{eq} , reduse la nivelul de tensiune statorică, (prin factorul $X_m/X_r=L_m/L_r$) amplasate în axele d și respectiv q .

Se introduc și se definesc reactanța și inductivitatea tranzitorie:

$$\begin{aligned}
 X' &= X_s - \frac{X_m^2}{X_r} \\
 L' &= L_s - \frac{L_m^2}{L_r}
 \end{aligned}
 \tag{5.37}$$

Cu aceste notații ecuațiile statorice devin:

$$\begin{aligned}
 u_d &= R \cdot i_d - X' \cdot i_q + u_{ed} \\
 u_q &= R \cdot i_q + X' \cdot i_d + u_{eq}
 \end{aligned}
 \tag{5.38}$$

Considerând regimul de funcționare sinusoidal trifazat simetric, ecuațiile (5.38) au aceeași formă dacă se consideră în locul valorilor momentane ale tensiunilor și curenților, valorile lor efective (în regim sinusoidal $U=u_{max}/1.41$).

$$\begin{aligned}
 U_d &= R \cdot I_d - X' \cdot I_q + U_{ed} \\
 U_q &= R \cdot I_q + X' \cdot I_d + U_{eq}
 \end{aligned}
 \tag{5.39}$$

Înmulțind a doua ecuație cu operatorul j , de rotire înainte cu $\pi/2$ și definind următorii vectori:

$$\begin{aligned}
 \underline{U} &= U_d + j \cdot U_q \\
 \underline{I} &= I_d + j \cdot I_q \\
 \underline{U}_e &= U_{ed} + j \cdot U_{eq}
 \end{aligned}
 \tag{5.40}$$

ecuațiile (5.39), prin însumare, pot fi scrise printr-o singură ecuație vectorială:

$$\underline{U} = R \cdot \underline{I} + j \cdot X' \cdot \underline{I} + \underline{U}_e
 \tag{5.41}$$

Ceea ce permite reprezentarea circuitului înfășurării statorice prin schema electrică echivalentă și diagrama fazorială din Fig.5.7.

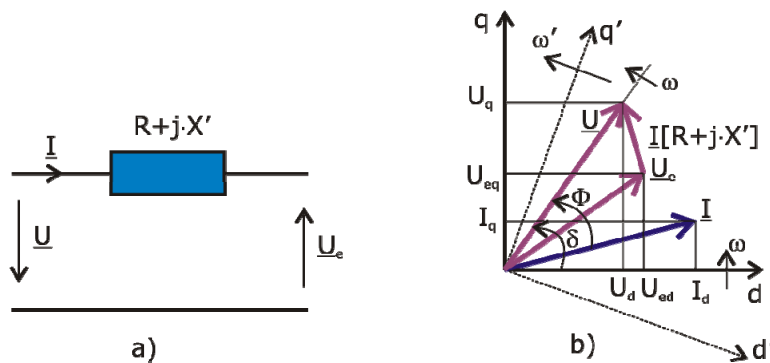


Fig.5.7. Înfășurarea statorică: a) schema echivalentă, b) diagrama fazorială.

Din considerente de generalitate, s-a admis ipoteza că sistemul de coordonate d, q , este un sistem comun tuturor componentelor de sistem și că se rotește cu pulsația sincronă ω , a tensiunii din sistem. Față de acest sistem de coordonate, tensiunea \underline{U} , de la bornele MI având pulsația ω , este defazată cu unghiul δ , a cărui valoare se determină în cadrul calculului regimului staționar al sistemului (calculul circulației de puteri).

Ecuțiile (5.39) pot fi scrise și sub forma a două ecuații vectoriale, considerând distinct circuitele statorice pe cele două axe.

În acest scop se definesc vectorii componentelor de tensiune și curent pe cele două axe, conform Fig.5.8., ceea ce permite scrierea ecuațiilor (5.39) sub forma:

$$\begin{aligned}\underline{U}_d &= R \cdot \underline{I}_d + j \cdot X' \cdot \underline{I}_q + \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_q &= R \cdot \underline{I}_q + j \cdot X' \cdot \underline{I}_d + \underline{U}_{eq}\end{aligned}\quad (5.42)$$

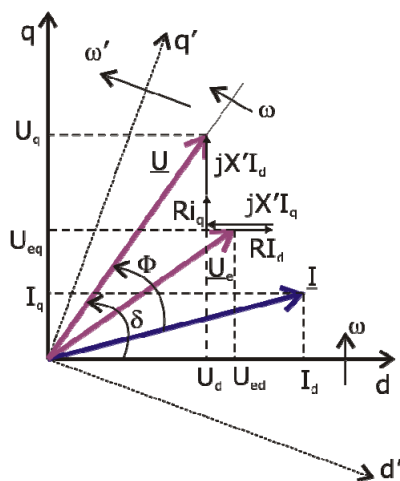


Fig.5.8. Diagrama fazorială a mărimilor statorice.

Reprezentare fazorială, Fig.5.8., evidențiază componentele căderii de tensiune pe impedanța echivalentă a MI: $R+jX'$. Acest mod de scriere a ecuațiilor statorice este mai ușor de reținut, iar din reprezentarea fazorială se pot sesiza ușor relațiile între mărimile care intervin.

5.3.3. Ecuațiile rotorice (de stare)

Evoluția în timp a t.e.m. tranzitorii \underline{U}_e este determinată de fluxurile rotorice. În vederea determinării sale se impune scrierea ecuațiilor circuitului electric echivalent înfășurării rotorice și ecuația de mișcare a rotorului.

Ecuațiile circuitului rotorice

Considerând rotorul MI în scurtcircuit, ecuațiile rotorice (5.16), devin:

$$\begin{aligned}u'_d &= R' \cdot i'_d + \frac{d\Psi'_d}{dt} - s \cdot \Psi'_q \cdot \omega = 0 \\ u'_q &= R' \cdot i'_q + \frac{d\Psi'_q}{dt} - s \cdot \Psi'_d \cdot \omega = 0\end{aligned}\quad (5.43)$$

Înlocuind curenții rotorici cu expresiile lor (5.32) acestea devin:

$$0 = \frac{R'}{L_r} \cdot [\Psi'_d - L_m \cdot i_d] + \frac{d\Psi'_d}{dt} - s \cdot \Psi'_q \cdot \omega$$

$$0 = \frac{R'}{L_r} \cdot [\Psi'_q - L_m \cdot i_q] + \frac{d\Psi'_q}{dt} - s \cdot \Psi'_d \cdot \omega$$
(5.44)

și introducând în locul fluxurilor rotorice, t.e.m. definite mai sus:

$$\bar{\omega} \cdot \Psi'_d = \frac{L_r}{L_m} \cdot U_{eq}$$

$$\bar{\omega} \cdot \Psi'_q = \frac{L_r}{L_m} \cdot U_{ed}$$
(5.45)

se obține sistemul de ecuații rotorice:

$$\frac{L_r}{R'} \cdot \frac{du_{eq}}{dt} = -u_{eq} + \frac{L_m^2}{L_r} \cdot \omega \cdot i_d - s \cdot \omega \cdot \frac{L_r}{R'} \cdot u_{ed}$$

$$\frac{L_r}{R'} \cdot \frac{du_{ed}}{dt} = -u_{ed} + \frac{L_m^2}{L_r} \cdot \omega \cdot i_q - s \cdot \omega \cdot \frac{L_r}{R'} \cdot u_{eq}$$
(5.46)

Din relația de definiție a inductivității L' rezultă:

$$\frac{L_m^2}{L_r} = L_s - L'$$
(5.47)

Raportul L_r/R' are dimensiune de timp și reprezintă constanta de timp a circuitului rotor deschis, pe scurt, constanta de timp rotorică, notată:

$$T'_{d0} = \frac{L_r}{R'}$$
(5.48)

Cu aceste notații ecuațiile rotorice devin:

$$T'_{d0} \cdot \frac{du_{eq}}{dt} = -u_{eq} + (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_d - s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{ed}$$

$$T'_{d0} \cdot \frac{du_{ed}}{dt} = -u_{ed} - (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_q + s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{eq}$$
(5.49)

Obținerea ecuațiilor rotorice de formă impusă (cerută) de CD ale MI, în sensul de a nu conține decât cele trei categorii de mărimi specifice acestora, și anume:

- parametrii MI: R, T'_{d0}, L_s, L' ;
- mărimi de sistem (MS): u, ω ;
- mărimi de stare: U_{ed}, U_{eq}, s ;

implică parcurgerea, în continuare, a următorilor pași:

- din ecuațiile înfășurării statorice (5.39) se explicitează curenții statorici, I_d , și I_q , care se introduc apoi în ecuațiile rotorice (5.49);
- se înlocuiește reactanța X' cu $\omega L'$, deoarece inductivitatea L' este considerată parametru și nu X' , care depinde de ω ;
- adoptând pentru tensiunea la borne coordonatele polare, în locul componentelor sale U_d, U_q , se vor introduce, amplitudinea, U , și faza sa, δ , conform diagramei fazoriale, din Fig.5.7:

$$U_d = U \cdot \cos \delta$$

$$U_q = U \cdot \sin \delta$$
(5.50)

unde δ reprezintă unghiul pe care-l face fazorul tensiunii la borne cu axa d , a sistemului rectanghiular de axe ale sistemului.

Observație: În cazul în care CC nu trebuie să-l raportăm la un sistem de axe d, q , comun și altor elemente de sistem, putem atașa acest sistem de coordonate, fazorului U , deci să se rotească cu pulsația ω , a acestuia, și în consecință, $\delta = \text{constant}$. Pentru simplificarea scrierii ecuațiilor, în acest caz, se va alege sistemul de axe d, q astfel încât una din axele sale să se suprapună peste fazorul U , în acest fel una din componentele tensiunii la borne devine egală cu aceasta, iar cealaltă egală cu zero. De exemplu: dacă se ia axa d după direcția fazorului tensiunii U , atunci: $\delta = 0$ și $u_q = 0$ iar $u_d = u$.

Ecuția de mișcare a rotorului

Ecuțiile (5.49) aferente tensiunilor din înfășurarea rotorică, trebuie completate cu ecuația de mișcare a rotoarelor (ale MI și mecanismului antrenat) prin care se va stabili valoarea alunecării, s , considerată ca mărime de stare:

$$J \cdot \frac{d\omega'}{dt} = C_e - C_m \quad (5.51)$$

unde:

$J = \frac{G \cdot D^2}{4} [kg \cdot m^2]$ - este momentul de inerție al rotoarelor (motor plus mecanism antrenat);

C_e - reprezintă cuplul electromagnetic (intern) dezvoltat de MI;

C_m - cuplul mecanic rezistent, produs de mecanismul antrenat.

Introducând în locul pulsației rotorice ω' , alunecarea s , utilizată în celelalte ecuații, dată de relația sa de definiție:

$$\omega' = \omega \cdot (1 - s) \quad (5.52)$$

și neglijând viteza de variația a pulsației tensiunii la borne ($d\omega/dt=0$), ecuația de mișcare, devine:

$$J \cdot \omega_0 \left[-\frac{ds}{dt} \right] = C_e - C_m \quad (5.53)$$

Alte forme de scriere a ecuației de mișcare a rotoarelor se obțin dacă se consideră în locul momentului de inerție, J , momentul unghiular:

$$M = J \cdot \omega_0 [Js/rad] \quad (5.54)$$

$$M \cdot \frac{ds}{dt} = C_m - C_e \quad (5.55)$$

sau dacă se introduce *constanta de timp mecanică*, T , definită prin relația:

$$T = \frac{M \cdot \omega_0}{P_n} [s] \quad (5.56)$$

unde P_n este puterea nominală a motorului, rezultă ecuația de mișcare a rotoarelor:

$$T \cdot P_n \cdot \frac{ds}{dt} = \bar{\omega}_0 \cdot (C_m - C_e) \quad (5.57)$$

care multiplicată cu raportul ω_0/P_n devine:

$$T \cdot \frac{ds}{dt} = Pm_r - Pe_r \quad (5.58)$$

unde:

Pm_r - este puterea mecanică în u.r.n. a mecanismului antrenat;

Pe_r - puterea electromagnetică internă, exprimată în u.r.n. a cărei expresie este:

$$P_{e_r} = u_{ed} \cdot i_d + u_{eq} \cdot i_q \quad (5.59)$$

Pentru a exprima puterea mecanică a mecanismului antrenat, P_m , se face precizarea conform căreia *cuplul mecanic*, sau *rezistent*, este dependent de turația rotorică, conform relației:

$$C_m = K_m \cdot \omega'^{\beta} = K_m \cdot [\omega \cdot (1-s)]^{\beta} \quad (5.60)$$

unde K_m și β sunt parametrii ce caracterizează cuplul rezistent al mecanismului antrenat. Acești parametri fie sunt dați în catalog, pentru diverse acționări, fie se determină prin măsurători asupra a două regimuri staționare distincte, pentru care se presupun cunoscute cuplul mecanic rezistent, C_m (sau P_m), identic cu cuplul electromagnetic $C_e(P_e)$, dacă se neglijează pierderile Joule, și modificarea alunecării s , iar pulsația ω , a tensiunii la borne se consideră constantă ($P_e = P_m$).

Exponentul β este dependent de tipul mecanismului antrenat și ia valori uzuale: $\beta = -1, 0, 1$ sau 2 (3).

Puterea mecanică corespunzătoare acestui cuplu este:

$$P_m = \omega' \cdot C_m = K_m \cdot [\omega \cdot (1-s)]^{\beta+1} \quad (5.61)$$

Cu aceste precizări, rezultă în final, ecuația de mișcare a rotoarelor:

$$T \cdot \frac{ds}{dt} = K_m \cdot [\omega \cdot (1-s)]^{\beta+1} - (u_{ed} \cdot i_d + u_{eq} \cdot i_q) \quad (5.62)$$

unde curenții statorici pot fi exprimați prin (5.42) ca funcții de tensiunea la borne și componentele t.e.m. u_e .

5.3.4. Ecuațiile de ieșire

Ecuațiile de ieșire ale CD reprezintă expresiile mărimilor caracteristice ale CC în funcție de mărimile de sistem, mărimile de stare și parametrii acestuia.

Dacă se consideră ca mărimi de ieșire componentele i_d și i_q ale curentului statoric pe axele d, q , atunci sistemul ecuațiilor de ieșire se obține explicitând curenții statorici din sistemul de ecuații (5.38).

$$\begin{aligned} i_d &= (u_d - u_{ed}) \cdot G + (u_q - u_{eq}) \cdot B \\ i_q &= -(u_d - u_{ed}) \cdot B + (u_q - u_{eq}) \cdot G \end{aligned} \quad (5.63)$$

unde pentru simplificarea scrierii s-au introdus notațiile:

$$\begin{aligned} G &= \frac{R}{(R^2 + X'^2)} \\ B &= \frac{X'}{(R^2 + X'^2)} \\ X' &= \omega \cdot L' \end{aligned} \quad (5.64)$$

Dacă puterea absorbită, activă și reactivă, se consideră mărimi caracteristice (de ieșire), atunci trebuie explicitate expresiile lor în funcție de MS și mărimile de stare. În acest caz, expresiile puterilor (valori momentane) absorbite de MI, pot fi deduse pornind de la cunoscutele relații între mărimi complexe și efective.

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + j \cdot Q \quad (5.65)$$

în care se introduc tensiunea și curentul prin componentele lor pe axele d și q :

$$P + j \cdot Q = (U_d + j \cdot U_q) \cdot (I_d - j \cdot I_q) = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q + j \cdot [U_q \cdot I_d - U_d \cdot I_q] \quad (5.66)$$

Rezultă astfel:

$$\begin{aligned} p &= u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q \\ q &= u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_q \end{aligned} \quad (5.67)$$

Scriind tensiunea la borne în coordonate polare, relațiile (5.50), și înlocuind curenții statorici cu expresiile lor (5.63), în (5.67) se obțin astfel, ecuațiile de ieșire scrise în forma matricială:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = u \cdot \begin{bmatrix} G & B \\ -B & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \cdot \cos \delta - u_{ed} \\ u \cdot \sin \delta - u_{eq} \end{bmatrix} \quad (5.68)$$

Expresiile (5.68) reprezintă ecuațiile de ieșire ale CD ale MI echivalent, avându-se în vedere faptul că intervin doar MS (u, ω) și mărimile de stare: u_{ed}, u_{eq}, s . Se face observația că în simbolurile G și B intervine ω , alături de parametrii R și L' ai MI, conform notațiilor (5.64). În consecință, aceștia nu pot fi considerați parametri constanți, ci doar R și L' .

5.3.5. Concluzii și sistematizare

CD ale MI echivalent, conțin două categorii de ecuații:

- ecuațiile diferențiale de stare, prin care se determină la un anumit pas de timp mărimile de stare, mărimi, în general, nemăsurabile;
- sistemul ecuațiilor de ieșire, ecuații algebrice, care ne dau valorile mărimilor de ieșire, de răspuns al MI la modificările MS.

Grupând aceste două categorii de ecuații, deduse anterior, obținem CD forma generală neliniară, scrise cu mărimi momentane și exprimate în u.r.:

$$\begin{aligned} T'_{d0} \cdot \frac{du_{eq}}{dt} &= -u_{eq} + (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_d - s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{ed} \\ T'_{d0} \cdot \frac{du_{ed}}{dt} &= -u_{ed} - (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_q - s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{eq} \\ T \cdot \frac{ds}{dt} &= K_m \cdot [\omega \cdot (1 - s)]^{\beta+1} - (u_{ed} \cdot i_d + u_{eq} \cdot i_q) \\ p &= u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q \\ q &= u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_d \end{aligned} \quad (5.69)$$

unde:

$$\begin{aligned} u_d &= u \cdot \cos \delta ; \quad u_q = u \cdot \sin \delta \\ i_d &= (u_d - u_{ed}) \cdot G + (u_q - u_{eq}) \cdot B \\ i_q &= -(u_d - u_{ed}) \cdot B + (u_q - u_{eq}) \cdot G \\ G &= \frac{R}{(R^2 + (\omega \cdot L')^2)} ; \quad B = \frac{\omega \cdot L'}{(R^2 + (\omega \cdot L')^2)} \end{aligned} \quad (5.70)$$

Aceste caracteristici redau răspunsul MI (prin MC: puterile absorbite) la modificările MS, (u, ω), considerând cazul general al unui sistem de axe rectanghiulare, d, q , comun tuturor elementelor de sistem, ce se rotește cu o turație sincronă, ω , determinată de evoluția sistemului considerat.

Referitor la CD deduse până aici, ecuațiile (5.69), se fac următoarele *observații*:

1) Sistemul de axe, d, q , de referință se consideră solidar cu câmpul magnetic statoric, deci se vor roti cu pulsația ω , egală cu pulsația tensiunii \underline{U} la borne. În consecință, unghiul δ , este constant, și dacă nu avem în sistemul electroenergetic considerat, alți consumatori reprezentați prin astfel de CD, el poate fi luat arbitrar, de exemplu $\delta=0$, (axa d identică cu fazorul tensiunii \underline{U} la borne).

2) Sistemul de ecuații (5.69) considerat împreună cu relațiile de substituție (5.70) conține practic, patru categorii de mărimi:

- parametrii MI echivalent: $L_s, L', R, T, T'_{d0}, K_m, \beta$, considerați constanți și cunoscuți. Ultimii doi parametri se referă la cuplul rezistent al mecanismului antrenat: β este exponentul caracteristicii cuplu-turație; iar K_m - este un coeficient care caracterizează gradul de încărcare cu putere activă al MI, corelând puterea activă P_o , absorbită în regim staționar cu parametrii MI echivalent;
- mărimi de intrare, constituite din:
 - o mărimi de sistem (MS): u și ω oferite de sistemul electroenergetic la borne (în nodul de racord);
 - o mărimile de regim: δ și P_o , rezultate din calculul circulației de puteri sau alese arbitrar, conform celor discutate la punctul 1). Se reamintește că P_o , chiar dacă nu apare explicit în CD, acesta intervine prin coeficientul K_m al cuplului rezistent;
- mărimile de stare: s, U_{ed}, U_{eq} , sunt mărimi intermediare, în general nemăsurabile, introduse pentru a descrie fenomenele de inerție mecanică și respectiv, magnetică ale MI;
- mărimea independentă t , timpul.

3) Deoarece sistemul de ecuații (5.69) s-a dedus având în vedere mașina trifazată simetrică în regim sinusoidal, CD își păstrează forma (5.69) și dacă în locul mărimilor momentane se introduc mărimile efective (notate cu majuscule), mărimi care sunt indicate de aparatele obișnuite de măsură. Acest lucru este convenabil pentru gândirea inginerească, obișnuită cu acest gen de mărimi.

4) Toate relațiile sunt scrise pentru u.r. considerând ca mărimi de bază mărimile caracteristice regimului staționar anteperturbație, mărimi care sunt considerate în cazul CC drept mărimi nominale.

5) Aducerea CD la forma generală explicită, în care să apară doar mărimile de sistem, mărimile de stare, parametrii, și mărimile caracteristice, așa cum au fost adoptate anterior, ar conduce la relații extrem de laborioase, care în condițiile utilizării unor algoritmi de calcul procedurali (secvențiali) nu se justifică. În plus, riscul erorilor este foarte mare și este dificil de controlat și depanat. Aceste forme sunt totuși necesare dacă se dorește exprimarea CD, prin alte tipuri de MM, cum ar fi cel liniarizat în jurul punctului staționar de funcționare, sau cel de funcții de transfer liniare.

5.4. Analiza regimurilor de gol de tensiune ale CC

Analiza regimurilor de gol de tensiune ale CC presupune dezvoltarea unui algoritm care să țină cont de cele două componente (statică și dinamică) ale consumatorului complex. Astfel în continuare se va dezvolta un algoritm pentru determinarea comportării MI la perturbații de tip gol de tensiune, iar ulterior se va

prezenta algoritmul programului pentru analiza comportării întregului consumator complex.

5.4.1. Analiza comportării MI la perturbații de tip gol de tensiune

Aspecte generale. Etapele analizei

Analiza regimului de gol de tensiune al MI înseamnă evaluarea răspunsului acestuia, reprezentat de mărimile caracteristice (MC), la variații relativ rapide (dinamice) ale mărimilor de sistem (MS).

Se face precizarea că în continuare toate mărimile electrice care intervin în CD se vor considera ca mărimi efective, mărimi indicate de aparatele uzuale de măsură.

Utilizarea CD neliniare în acest scop, implică parcurgerea următorilor pași, reprezentați și în ordinograma din Fig.5.9 a algoritmului de analiză a regimurilor tranzitorii [Moga2008].

a) din calculul circulației de puteri în sistemul electroenergetic se determină mărimile de sistem, U_0 , ω_0 , mărimile de regim, încărcarea activă, P_0 și poziția sistemului de axe d, q față de fazorul tensiunii la borne, reprezentată prin unghiul δ_0 ;

b) se calculează mărimile caracteristice regimului staționar de referință ante-perturbație: mărimile de stare, mărimile de regim neexplicitate de calculul circulației de puteri, iar cu relațiile (5.50) componentele U_{d0} și U_{q0} ale tensiunii la borne, conform etapelor ce se vor prezenta în paragraful următor;

c) în primul moment al producerii perturbației, (creată de modificarea MS), la timpul 0_+ , datorită caracterului inerțial al mărimilor de stare, acestea pot fi considerate că rămân neschimbate față de regimul staționar ante-perturbație, de la momentul 0_- . Cu alte cuvinte, mărimile de stare fac legătura între regimul ante-perturbație și primul moment al regimului perturbant;

d) se consideră perturbația prin introducerea mărimilor de sistem $U=U_0+\Delta U(t_0)$, $\omega=\omega_0+\Delta\omega(t_0)$, unde $\Delta U(t_0)$ și $\Delta\omega(t_0)$ sunt abaterile MS în momentul t_{0+} , imediat producerii perturbației;

e) considerând mărimile de stare egale cu s_0 , U_{ed0} , U_{eq0} , din regimul ante-perturbație, și noile valori ale MS, se calculează MC: P și Q în primul moment, $t=t_{0+}$, al regimului tranzitoriu.

În continuare, procesul se repetă de N ori, pentru cele $N-1$ intervale de timp ale analizei. Astfel, pentru un pas oarecare i , ($i=1, \dots, N-1$) se vor parcurge etapele:

f) se actualizează mărimile de sistem: $U = U_0 + \Delta U(t_i)$ și $\omega = \omega_0 + \Delta\omega(t_i)$;

g) cu noile mărimi de sistem se determină valorile mărimilor de stare: s , U_{ed} , U_{eq} ; la momentul $t_i=t_{i+1}+\Delta t$, prin rezolvarea sistemului ecuații diferențiale ale CD. Intervalul de timp Δt , se alege arbitrar, (desigur având în vedere câteva condiții, legate de timpul de calcul și fidelitatea analizei);

h) se determină MC, P și Q la momentul de timp t_i prin rezolvarea sistemului de ecuații de ieșire ale CD;

i) se incrementează timpul cu Δt și se repetă punctele f), g) și h) pentru următorul moment, t_{i+1} , până la expirarea timpului de analiză ($t = t_{fin} = N \cdot \Delta t$);

Utilizarea CD neliniare în analiza comportării tranzitorii a CC, reprezentat printr-un MI echivalent, presupune cunoscuți parametrii acestuia: L_S , L' , R , T , T'_{d0} , K_m , β , mărimile de stare, din regimul ante-perturbație, s_0 , U_{ed0} , U_{eq0} și evoluția în timp a MS: U , ω .

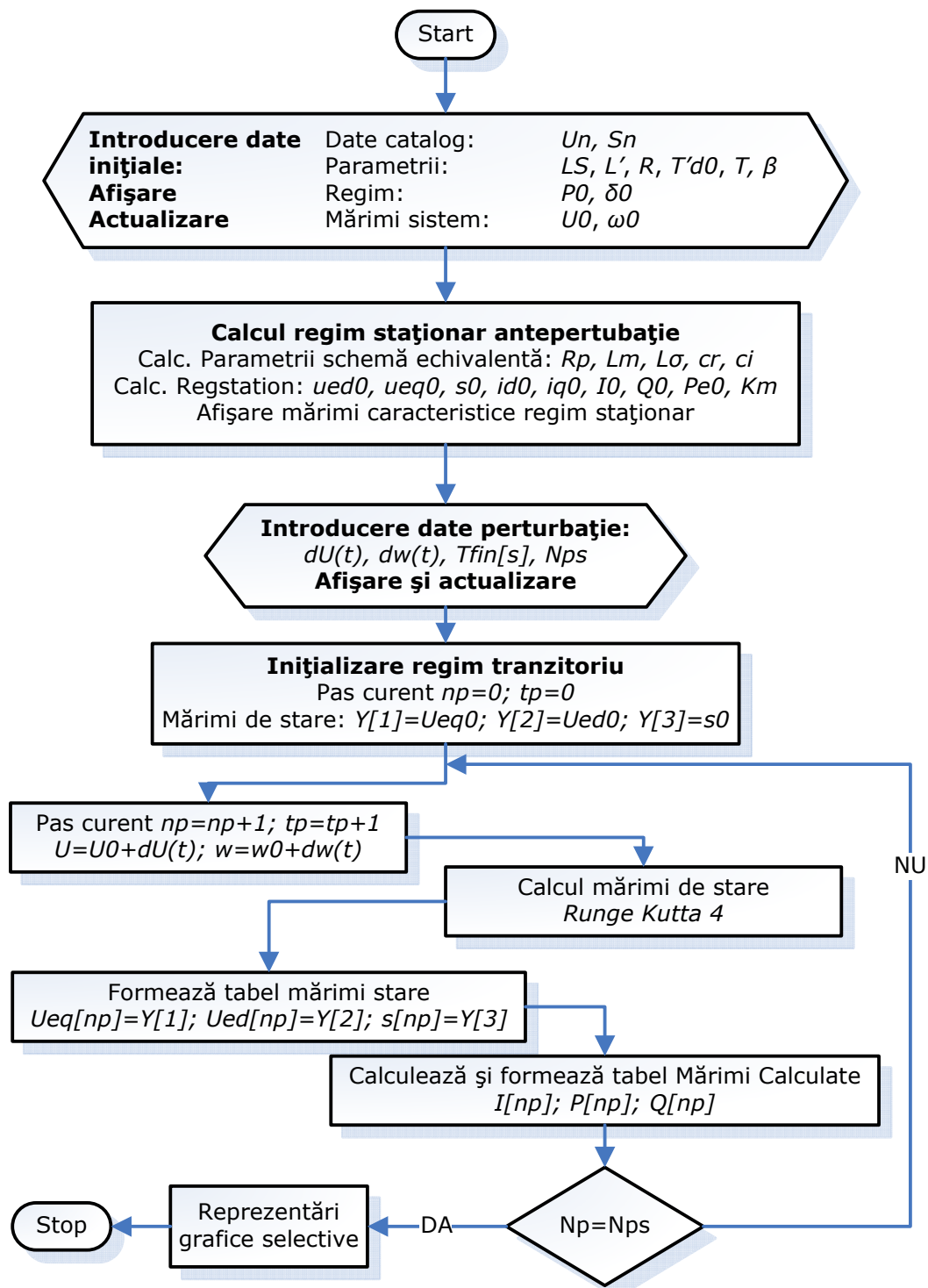


Fig.5.9. Ordinograma programului de analiză a regimului tranzitoriu al MI.

Considerând evoluția MS cunoscută, dată de evoluția în timp a SEE, rămâne de determinat mărimile caracteristice regimului staționar ante-perturbație.

Determinarea mărimilor caracteristice regimului staționar

Se consideră cunoscut:

- parametrii MI: $L_S, L', R, T, T'_{d0}, \beta;$

- mărimile de regim și de intrare: $P_0, U_0, \omega_0, \delta_0$.

Trebuie determinat:

- mărimile de stare: s_0, U_{ed0}, U_{eq0} ;
- mărimi de ieșire: Q_0, i_{d0}, i_{q0}, K_m .

O rezolvare a problemei constă în soluționarea sistemelor de ecuații (5.69), și (5.70), considerat în regim staționar, în care derivatele se consideră nule. Deoarece puterea activă P_0 nu intervine explicit în aceste ecuații, aceasta se va considera prin coeficientul K_m al cuplului rezistent, impunând $K_m = P_0$.

Rezultă astfel, un sistem de cinci ecuații neliniare, cu cinci necunoscute: $s_0, U_{ed0}, U_{eq0}, i_{d0}, i_{q0}$ a cărui rezolvare implică utilizarea unei metode iterative, cum ar fi: Gauss - Seidel sau Newton [Kilyeni2001], [Kilyeni2004].

Datorită slabei convergențe și în cele mai multe cazuri, a divergenței procesului iterativ, (dependent de valorile inițiale) se prezintă în continuare, o metodă de rezolvare a regimului staționar pe baza schemei echivalente în „L” a MI, Fig.5.10. Această metodă permite introducerea puterii active P_0 , absorbite de MI în regim anteperturbație ca mărime de intrare.

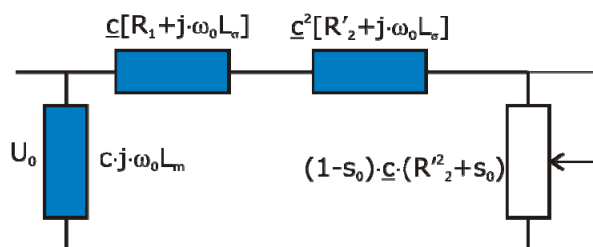


Fig.5.10. Schema echivalentă a MI.

Schema echivalentă în „L” a MI pentru regim staționar [Dordea1977], conține parametrii:

$$L_m = \sqrt{L_s^2 - L_s \cdot L'} \text{ - inductivitatea de magnetizare;}$$

$$L_\sigma = L_s - L_m \text{ - inductivitatea de dispersie;}$$

$$R'_2 = \frac{L_s}{T'_{d0}} \text{ - rezistența înfășurării rotorice;}$$

$$\underline{c} = 1 + \frac{(R + j \cdot \omega \cdot L_\sigma)}{j \cdot \omega \cdot L_m} \text{ - coeficient de transformare schemă echivalentă T - schemă L.}$$

Rezistențele înfășurărilor statorice R_1 , și rotorice R'_2 ale mașinii reale sunt egale cu rezistențele corespunzătoare, R și respectiv, R' , ale mașinii echivalente dacă acestea sunt exprimate în u.r.

Coeficientul de transformare \underline{c} , poate fi scris sub forma:

$$\underline{c} = c_r - j \cdot c_j \quad (5.71)$$

unde:

$$c_r = 1 + \frac{L_s}{L_m} \quad c_j = \frac{R}{\omega_0 \cdot L_m} \quad (5.72)$$

Dacă se însumează cele trei impedanțe serie din schema echivalentă se obține o schemă echivalentă redusă (Fig.5.11).

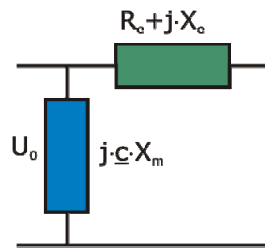


Fig.5.11. Schema echivalentă redusă a MI.

În această schemă intervine impedanța $\underline{Z}_e = R_e + j \cdot X_e$, ale cărei componente sunt dependente de alunecarea s_0 conform relațiilor:

$$R_e = c_r \cdot R_1 + R_2' \cdot \frac{c_{2r}}{s_0} + (c_i + c_{2i}) \cdot \omega \cdot L_\sigma \quad (5.73)$$

$$X_e = -c_i \cdot R_1 - R_2' \cdot \frac{c_{2i}}{s_0} + (c_r + c_{2r}) \cdot \omega \cdot L_\sigma$$

cu c_{2r} și c_{2i} s-au notat, pentru simplificarea scrierii, componentele fazorului:

$$\underline{c}^2 = c_{2r} - j \cdot c_{2i} = (c_r^2 - c_i^2) - j \cdot 2 \cdot c_r \cdot c_i \quad (5.74)$$

Determinarea alunecării S_0

Puterea activă P_0 , absorbită de circuitul echivalent din Fig.5.11, este:

$$P = \frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2} \cdot U^2 \quad (5.75)$$

unde pentru simplificarea scrierii, s-a renunțat la indicele „0”, acesta subînțelegându-se, având în vedere că în continuare nu intervin decât mărimi din regimul staționar. Această simplificare se va păstra și mai departe.

Rezolvând ecuația de mai sus în raport cu R_e , rezultă (soluția pozitivă a ecuației):

$$R_e = \frac{U^2}{2 \cdot P} + \sqrt{\frac{U^4}{4 \cdot P^2} - X_e^2} \quad (5.76)$$

unde X_e poate fi aproximat cu:

$$X_e = -c_i \cdot R_1 - c_{2i} + (c_r + c_{2r}) \cdot \omega \cdot L_\sigma \quad (5.77)$$

datorită faptului că în regimuri apropiate de regimul nominal, $s_0 = R_2'$, exprimat în u.r.n. și deci termenul $R_2' \cdot c_{2i} / s_0$ poate fi aproximat cu c_{2i} .

Din relația de definiție a rezistenței R_e se obține valoarea alunecării s_0 în regim staționar ante-perturbație:

$$s_0 = \frac{c_{r2} \cdot R_2'}{R_e - c_r \cdot R_1 - (c_i + c_{2i}) \cdot \omega \cdot L_\sigma} \quad (5.78)$$

Determinarea componentelor tensiunii u_e

Anulând derivatele tensiunii electromotoare u_e din ecuațiile (5.69) rezultă sistemul de ecuații:

$$\begin{aligned} u_{eq} &= (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_d - s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{ed} \\ u_{eq} &= (L_s - L') \cdot \omega \cdot i_d - s \cdot \omega \cdot T'_{d0} \cdot u_{ed} \end{aligned} \quad (5.79)$$

ce se completează cu relațiile pentru curenții statorici:

$$\begin{aligned} i_d &= (u_d - u_{ed}) \cdot G + (u_q - u_{eq}) \cdot B \\ i_q &= -(u_d - u_{ed}) \cdot B + (u_q - u_{eq}) \cdot G \end{aligned} \quad (5.80)$$

Dacă se înlocuiește:

$$L_s - L' = \frac{L_m^2}{L_s} \quad (5.81)$$

se obține un sistem de două ecuații având ca necunoscute componentele tensiunii u_e :

$$\begin{aligned} \left[1 + \omega \frac{L_m^2}{L_s} B \right] \cdot u_{ed} &= \left[T'_{d0} \cdot s \cdot \omega + \omega \frac{L_m^2}{L_s} G \right] \cdot u_{eq} - \omega \frac{L_m^2}{L_s} \cdot [u_q \cdot G - u_d \cdot B] \\ \left[1 + \omega \frac{L_m^2}{L_s} B \right] \cdot u_{eq} &= - \left[T'_{d0} \cdot s \cdot \omega + \omega \frac{L_m^2}{L_s} G \right] \cdot u_{ed} + \omega \frac{L_m^2}{L_s} \cdot [u_d \cdot G - u_q \cdot B] \end{aligned} \quad (5.82)$$

Pentru simplificarea scrierii se reamintește că s-a omis indicele "0" pentru MS și mărimile de stare. Din aceleași motive, se introduc și notațiile:

$$\begin{aligned} m1 &= 1 + \omega \cdot \frac{L_m^2}{L_s} \cdot B \\ m2 &= T'_{d0} \cdot s \cdot \omega + \omega \cdot \frac{L_m^2}{L_s} \cdot G \\ md &= \omega \cdot \frac{L_m^2}{L_s} \cdot [u_q \cdot G - u_d \cdot B] \\ mq &= \omega \cdot \frac{L_m^2}{L_s} \cdot [u_d \cdot G + u_q \cdot B] \end{aligned} \quad (5.83)$$

unde m^* ($* = 1, 2, d, q$), reprezintă constante cunoscute deja.

Rezolvând sistemul de ecuații de mai sus, se obține:

$$\begin{aligned} u_{eq0} &= \frac{[md \cdot m2 + mq \cdot m1]}{[m1^2 + m2^2]} \\ u_{ed0} &= \frac{[-md \cdot m1 + mq \cdot m2]}{[m1^2 + m2^2]} \end{aligned} \quad (5.84)$$

În continuare, cu relațiile (5.63) se pot determina curenții statorici i_{d0} și i_{q0} iar cu relațiile (5.67) se calculează puterea reactivă Q_0 și se verifică rezultatele calculând puterea activă impusă, P_0 .

Determinarea coeficientului K_m din expresia cuplului mecanic rezistent

Cuplul mecanic rezistent, în regim staționar este de forma:

$$Cm_0 = K_m \cdot \omega'^B \quad (5.85)$$

și poate fi considerat egal cu cuplul electromagnetic dezvoltat de MI. În consecință:

$$\begin{aligned} P_{e0} &= Cm_0 \cdot \omega' \\ U_{ed0} \cdot I_{d0} + U_{eq0} \cdot I_{q0} &= K_m \cdot [\omega_0 \cdot (1 - s_0)]^{\beta+1} \end{aligned} \quad (5.86)$$

de unde rezultă:

$$K_m = \frac{U_{ed0} \cdot I_{d0} + U_{eq0} \cdot I_{q0}}{[\omega_0 \cdot (1 - s_0)]^{\beta+1}} \quad (5.87)$$

În finalul algoritmului, se rezolvă sistemul de ecuații diferențiale prin aplicarea metodei Runge-Kutta de ordinul 4 [Kilyeni2001], [Kilyeni2004].

5.4.2. Algoritm pentru analiza comportării CC la perturbații de tip gol de tensiune

Analiza comportării consumatorilor complecși la perturbații de tip gol de tensiune, implică urmărirea câtorva pași, în conformitate cu ordinograma din Fig.5.12 [Molnar2010b].

În prima etapă se introduc parametrii consumatorului complex și prin calcule de circulație de putere, se determină mărimile de sistem (U_0 , ω_0) și mărimile de regim (P_0 , δ_0).

În pasul următor se introduc mărimile caracteristice golului de tensiune: tipul golului (conform clasificării ABC), amplitudinea și durata golului. Deoarece golurile de tensiune sunt nesimetrice, acestea se transformă în componente de secvență cu ajutorul relației (5.88).

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_+ \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad (5.88)$$

$$\text{unde: } a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

După cum am precizat la începutul capitolului, CC este împărțit în două componente, iar algoritmul propus tratează independent fiecare componentă. Pentru componenta statică calculul curenților pe faze și a puterilor activă și reactivă în regim tranzitoriu este foarte ușor, iar realizarea lui se face într-un singur pas.

Pentru componenta dinamică, se aplică un algoritm de calcul din Fig.5.9, care se poate aplica doar pentru sisteme de tensiune simetrice. Astfel, pentru cazul golurilor de tensiune nesimetrice, s-a calculat anterior componentele de secvență, care reprezintă sisteme de tensiune simetrice. Astfel, algoritmul dezvoltat pentru analiza regimurilor tranzitorii la MI se aplică atât pentru componenta de secvență directă cât și pentru cea de secvență inversă cu precizarea că pentru secvența inversă alunecarea este $s_{-}=2-s$ [Boldea2002]. Tot în literatura de specialitate [Boldea2002] se precizează că în cazul motorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit, componenta homopolară nu are influență în comportarea acestuia.

Prin aplicarea algoritmului pentru simularea regimului tranzitoriu, se obțin componentele de secvență directă și inversă pentru curenți, și considerând curentul homopolar ca fiind nul, se pot determina curenții pe faze cu relația (5.89).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{Rd} \\ \underline{I}_{Sd} \\ \underline{I}_{Td} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_+ \\ \underline{I}_- \end{bmatrix} \quad (5.89)$$

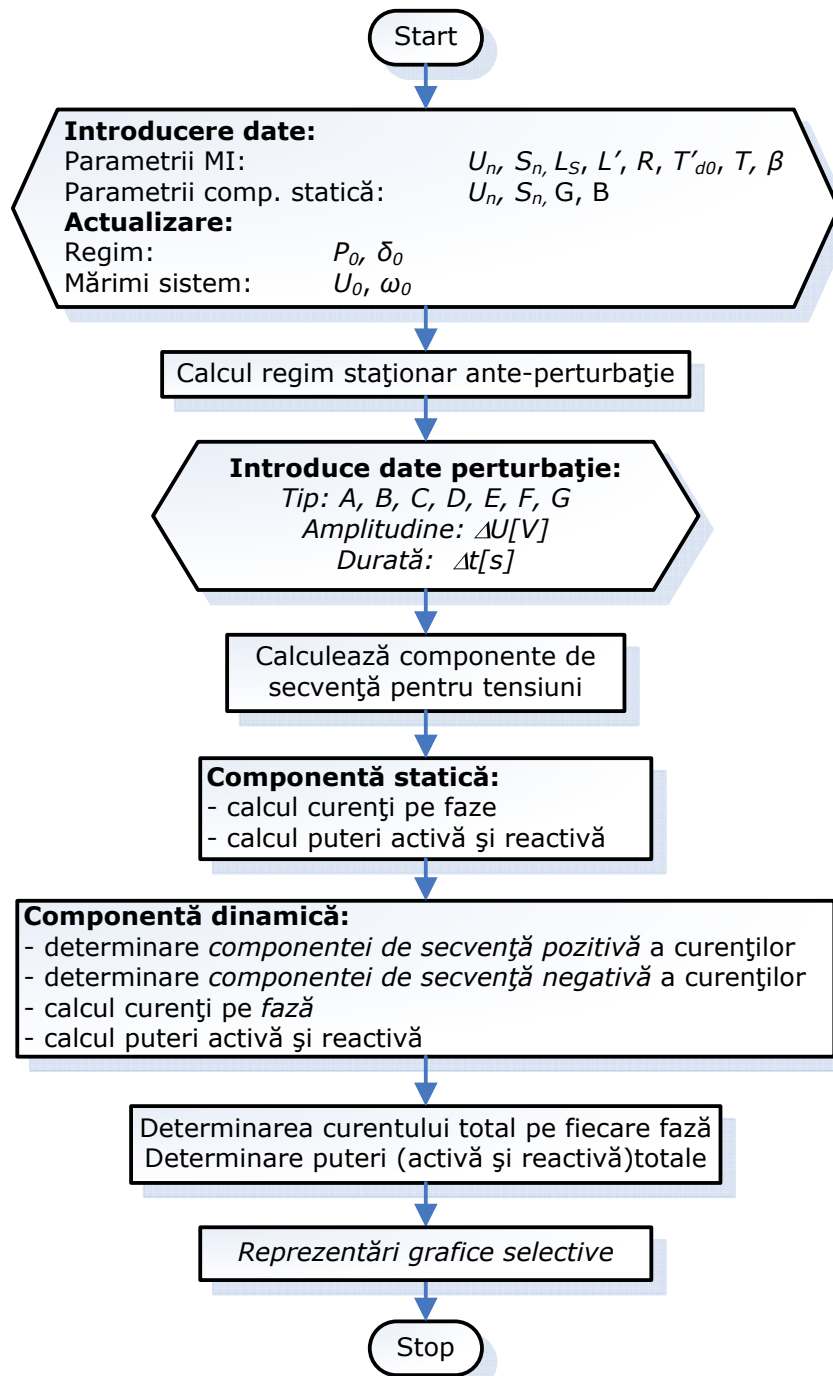


Fig.5.12. Ordinograma programului de analiză a regimului tranzitoriu al CC.

În final se pot calcula curenții totali pe faze, respectiv puterile totale. Programul permite reprezentări grafice selective.

5.5. Validarea modelului matematic

Validarea modelului matematic se realizează în trei etape:

- stabilirea sistemului etalon;
- considerarea unui consumator complex cunoscut;

- compararea rezultatelor obținute, pentru aceeași perturbație aplicată.

Sistemul etalon poate fi considerat sistemul real, adică înregistrarea unor măsurători reale, obținute la o perturbație dată, pentru un consumator cunoscut. Această metodă este mai dificilă deoarece necesită cunoașterea cu exactitate a consumatorului complex real. O a doua problemă este aceea de imposibilitate de a se aplica o perturbație dată, motiv pentru care ne putem baza pe apariția unui gol de tensiune la bornele consumatorului complex. Și acest lucru atrage după sine determinarea cât mai exactă a perturbației apărute.

Tot ca și sistem etalon se poate considera un model matematic consacrat, care este general acceptat. Acest tip de sistem etalon este mai ușor de implementat deoarece se poate introduce aceleași mărimi pentru consumatorul complex, și aceeași perturbație la borne, ca și în cazul modelului care trebuie validat.

În această lucrare, s-a folosit, ca și sistem etalon, programul MATLAB (MATrix LABoratory) care este un pachet de programe de înaltă performanță, interactiv, destinat calculului matematic, științific și ingineresc. MATLAB integrează calcul, programare și vizualizare, într-un mediu de lucru prietenos, soluționarea problemelor presupunând folosirea notațiilor matematice clasice.

Din complexitatea acestui mediu de dezvoltare s-a ales utilizarea programului Simulink care este un mediu interactiv de simulare dinamică a sistemelor liniare, neliniare, discrete, continue în timp, discrete în timp sau hibride. Modelul matematic al motorului asincron ce se găsește în librăria SimPowerSystems, din programul Simulink, are la bază un model matematic dezvoltat în [Krause2002].

Astfel în Fig.5.13 se prezintă schema pentru simularea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex.

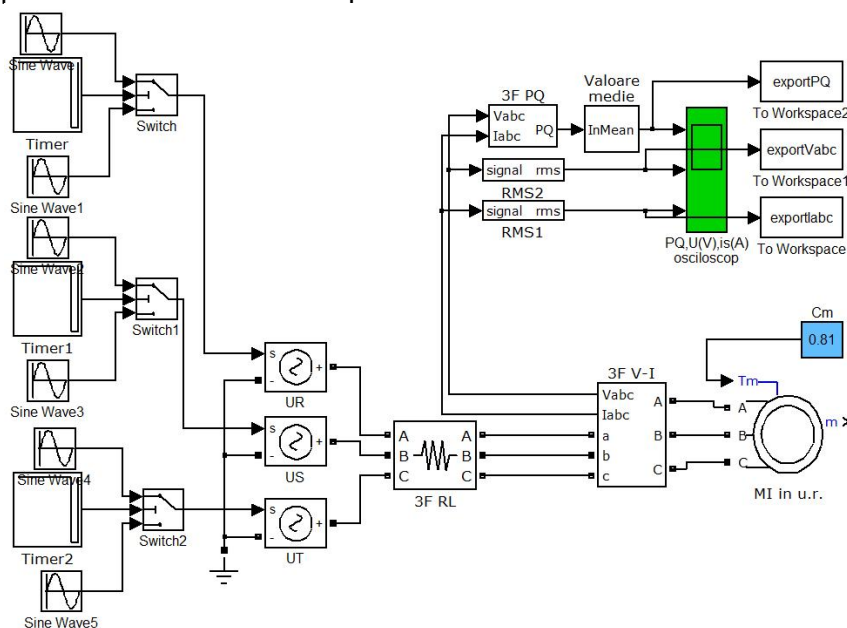


Fig.5.13. Schema de simulare a comportamentului unui motor asincron, realizată în Matlab.

Schema este formată dintr-o sursă de alimentare care practic simulează sistemul echivalent la bornele consumatorului, care generează o tensiune de 110kV, un echipament de măsură, și o mașină asincronă.

Sursa de alimentare este realizată astfel încât să poată genera la un moment de timp, un gol de tensiune de o anumită durată. Pentru realizarea sursei s-a pornit de la principiul că un generator poate fi reprezentat printr-o sursă ideală de tensiune și o impedanță internă.

Sursa ideală de tensiune trifazată este formată din trei surse de tensiune monofazate, comandate. Cele trei surse au setate defazaje diferite pentru tensiunii astfel încât sistemul obținut este un sistem trifazat simetric. S-au utilizat surse de tensiune comandate pentru a se putea specifica momentul, valoarea și durata golului de tensiune. Comanda lor se face de la un comutator, care are la intrare trei semnale, unul folosit pentru stabilirea timpilor de comutare, iar celelalte două sunt semnalele sinusoidale, unul de valoare nominală și unul de valoare golului de tensiune. În cazul de față, cele două surse de semnal sinusoidal au valorile de 110kV respectiv 88kV, adică vom simula un gol de tensiune care produce o scădere de tensiune de 20% din tensiune nominală. Semnalul de comutare ne dă timpii în care cele două surse de semnal sunt active.

După cum se poate observa pentru fiecare fază s-a realizat un astfel de sistem de comandă de unde rezultă că această schemă se poate folosi pentru simularea diferitelor tipuri de goluri de tensiune, adică atât simetrice cât și nesimetrice.

A doua zonă din schemă este formată din blocul de măsură. Acest bloc de măsură este format dintr-un aparat de măsură a tensiunilor și curenților momentani. Aceste valori sunt prelucrate astfel încât să se poată trasa grafice și eventual exporta date pentru utilizarea lor în alte programe. Pentru a reprezenta grafic variația tensiunilor și curenților este suficient trecerea semnalului de la aparatul de măsură printr-un bloc care realizează extragerea valorii efective a semnalului de intrare și apoi afișarea rezultatului pe un osciloscop.

Pentru obținerea valorilor puterilor active și reactive se utilizează un bloc de calcul care are la intrare valorile momentane ale tensiunilor și curenților, iar la ieșire se obține valorile momentane ale puterilor active și reactive. Aceste valori se trec de asemenea, printr-un bloc de calcul al valorilor efective, iar acestea din urmă sunt afișate pe osciloscop.

Pentru a extrage valorile curenților, tensiunilor și a puterilor s-au folosit blocuri care extrag informația după o anumită regulă și o afișează în fereastra denumită „workspace”. S-a ales extragerea valorilor de tensiunilor, curenților și a puterilor la interval de o milisecundă pentru un durată totală de o secundă. Acest interval s-a ales astfel încât să cuprindă 0.1 secunde din regiunea ante-perturbație, 0.5 secunde pe durata perturbației și 0.4 secunde după dispariția perturbației.

Ultimul element al acestei scheme de simulare, o reprezintă mașina asincronă care simulează consumatorul complex considerat. Această mașină asincronă s-a introdus în unități relative.

Consumatorul complex utilizat pentru verificarea modelului matematic a fost cel utilizat în [Moga2008]. Pentru componenta rotativă a acestuia se cunosc următoarele date:

- putere nominală: $P_n=2MW$;
- tensiunea nominală: $U_n=110kV$;
- frecvența nominală: $f_n=50Hz$;
- rezistența statorică: $R_1=0.032u.r.$;
- rezistența rotorică: $R'_2=0.032u.r.$;
- inductanțele de dispersie statorică și rotorică: $L_{\sigma 1}=L'_{\sigma 2}=0.1087u.r.$;
- inductanța mutuală: $L_m=1.9853u.r.$;
- constanta de timp mecanică: $T=0.26s$;
- cuplul mecanic rezistent: $C_m=0.81u.r.$

În continuare se prezintă grafic, datele obținute cu ajutorul modelul matematic dezvoltat în lucrare în Fig.5.14, și cu MatLab în Fig.5.15.

Din analiza puterii active obținute cu cele două modele matematice, se observă că aceste au variații asemănătoare. În plus valorile maxime la care ajung sunt aproape identice: pentru primul grafic $P_{max}=2.009MW$, iar pentru MatLab, $P_{max}=2.018MW$. Aceleași concluzii se pot observa și pe graficul curentului pe fază cu precizarea că pentru primul grafic $I_{max}=20.03A$, iar pentru MatLab, $I_{max}=19.98A$.

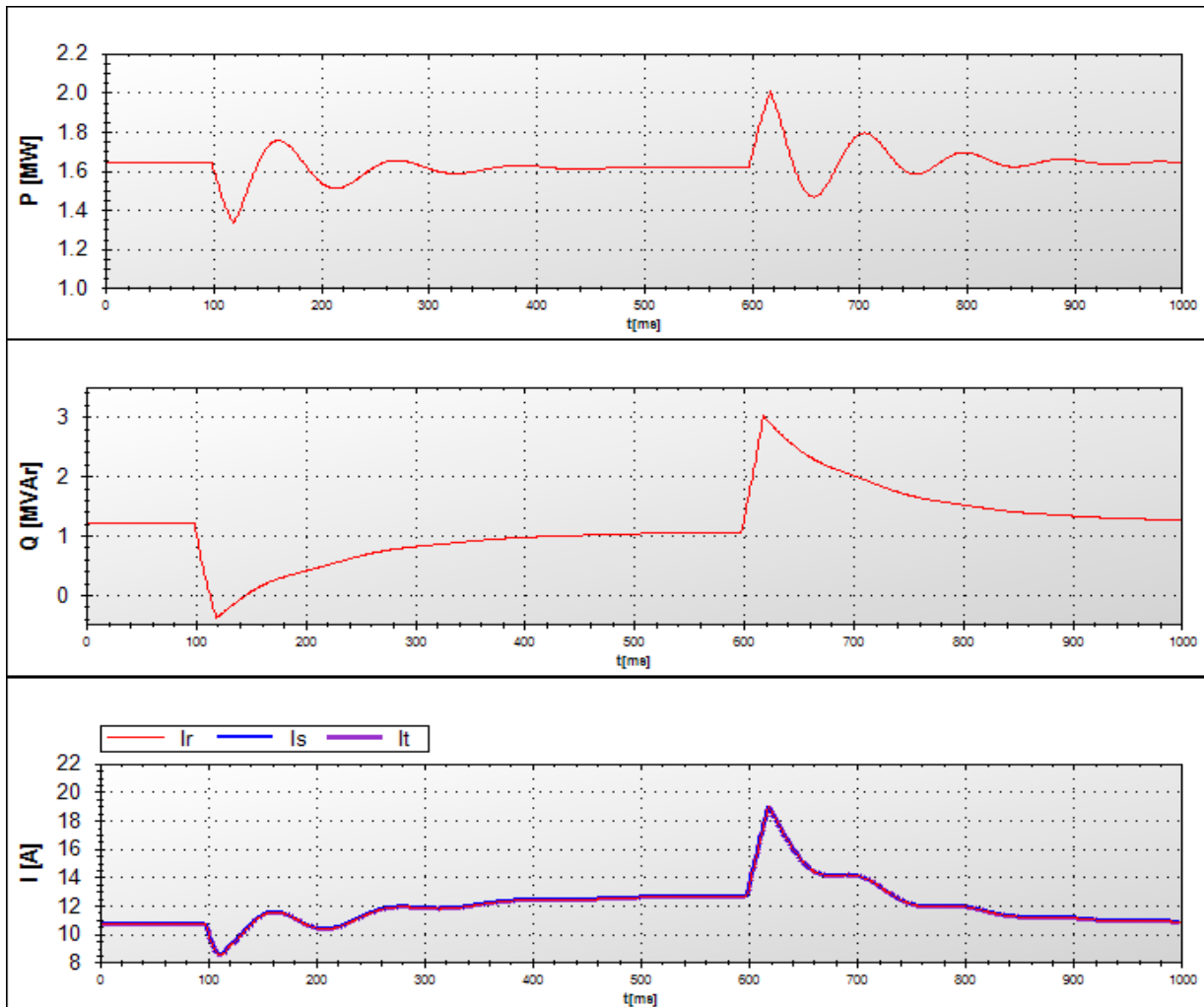


Fig.5.14. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) obținute cu modelul matematic dezvoltat în această lucrare.

Totuși apare o diferență în variație, mai ales la apariția golului de tensiune. Aceasta se datorează defazajului tensiunii față de tensiunea de referință, adică de valoarea momentană a tensiunii la momentul apariției golului de tensiune. Pentru modelul matematic dezvoltat s-a considerat că tensiunea momentană este nulă. În schimb în MatLab defazajul are o anumită valoare.

Pe graficele puterii reactive se observă aceeași variație cu precizarea că valorile minime și maxime sunt aproape identice: pentru primul grafic $Q_{min}=-0.49MVAR$ și $Q_{max}=3.25MVAR$, iar pentru MatLab, $Q_{min}=-0.3MVAR$ și $Q_{max}=3.08MVAR$.

Tot pe curbele curentilor se poate observa o creștere a valorii curentului pe durata perturbației. Pe ambele grafice se observă o creștere a curentului de la aproximativ 11A la 13A.

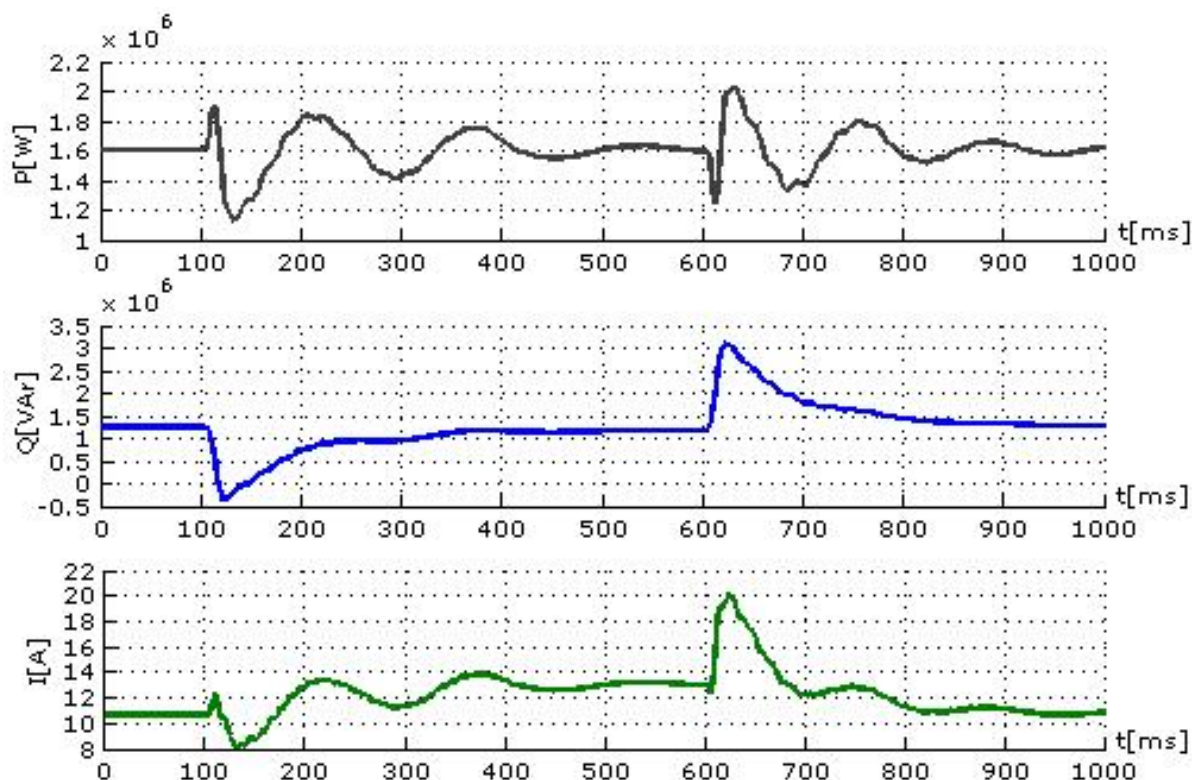


Fig.5.14. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) obținute cu modelul matematic din MatLab.

O diferență care apare prin compararea celor trei perechi de grafice, o reprezintă momentul în care se atinge o valoare maximă sau minimă. Această diferență este de aproximativ 20ms și ea apare datorită faptului că în MATLAB, mărimile se calculează în valori momentane, iar apoi sunt transformate în valori medii (puterile activă și reactivă) sau efective (curent). Această transformare se face prin considerarea valorilor momentane obținute pe ultima perioadă a frecvenței fundamentale. În modelul matematic dezvoltat, operațiile se realizează în valori efective (u.r.), și deci momentul de apariție sau de sfârșit al perturbației coincide cu momentul de apariție a valorii maxime sau minime a mărimii urmărite.

Toate cele prezentate mai sus confirmă faptul că modelul matematic dezvoltat în acest capitol, furnizează rezultate asemănătoare cu un model matematic mult mai complex, deci se pretează utilizarea sa, pentru identificarea efectelor golurilor de tensiune asupra CC.

5.6. Determinarea experimentală a parametrilor consumatorului complex

Pentru a putea studia influența golurilor de tensiune asupra consumatorilor complecși reali este necesară determinarea parametrilor acestora, în cadrul procedurii de identificare a CC.

Identificarea experimentală a CD ale CC presupune estimarea parametrilor independenți, pe baza prelucrărilor statistice a datelor de intrare și ieșire, obținute prin achiziții de date în timpul perturbațiilor de tip gol de tensiune.

Estimarea parametrilor independenți a unui motor de inducție depinde semnificativ de:

- modelul matematic utilizat pentru reprezentarea motorului de inducție;
- metoda matematică prin care se estimează parametrii;
- modul de inițializare a parametrilor și de ordinea în care aceștia sunt estimați.

Din punct de vedere al modelului matematic s-a demonstrat în [Moga1989] că una dintre cele mai bune soluții de identificare a unui consumator complex este dată de reprezentarea acestuia prin CD. Din acest motiv am considerat că modelul matematic dezvoltat în acest capitol este suficient de precis pentru estimarea parametrilor consumatorului complex.

Din punct de vedere a metodei matematice utilizate pentru estimarea parametrilor, am ales utilizarea metodei celor mai mici pătrate (MCMMP), forma generalizată. În principiu procedura începe cu inițializarea parametrilor, după care pornind de la mărimile de intrare cunoscute se generează mărimile de ieșire furnizate de model. Rezultatele sunt comparate cu măsurătorile reale obținute prin achiziții de date. Pentru compararea mărimilor de ieșire, se calculează diferența dintre mărimea calculată și cea măsurată la fiecare interval de măsurare, după care se sumează pătratele diferențelor obținute. Pentru aproximarea cât mai exactă a parametrilor, suma pătratelor obținută trebuie minimizată (într-un caz ideal ajunge la zero). Bineînțeles, la aplicarea acestei metode, contează foarte mult modul de inițializare și ordinea de estimare a parametrilor. Algoritmul realizat pentru estimarea parametrilor CC este prezentat în Fig.5.16.

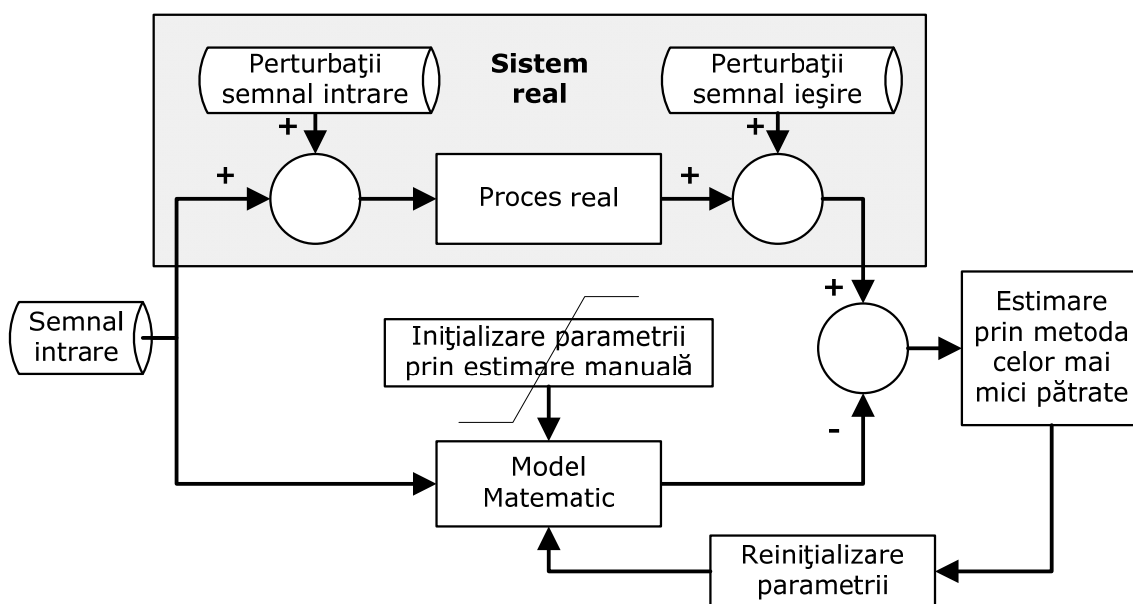


Fig.5.16. Algoritmul de estimare a parametrilor CC.

Pentru identificarea modului în care fiecare parametru al motorului asincron influențează forma curbelor curenților și a puterilor absorbite de la rețea, s-a utilizat modelul matematic realizat, prezentat în Fig.5.12.

În continuare se va prezenta rezultatele obținute prin modificarea, pe rând, a parametrilor motorului de inducție echivalent. Din analiza grafică comparativă se va extrage concluziile privind ordinea de estimare a parametrilor CC.

Modificarea rezistenței statorice

În Fig.5.17 se prezintă variația curenților și puterilor absorbite de la rețea datorită modificării valorii rezistenței statorice ale mașinii asincrone echivalente.

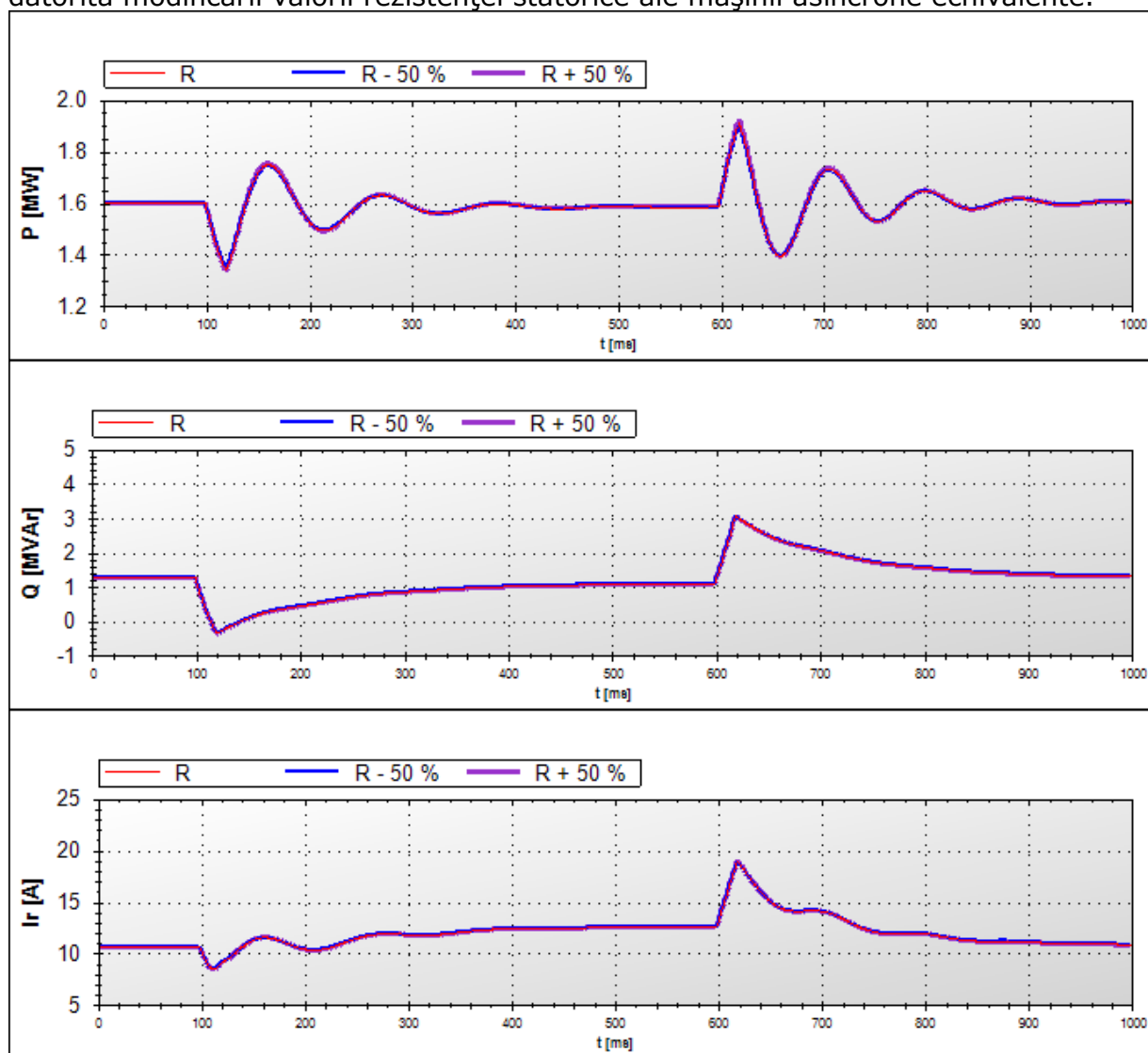


Fig.5.17. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii rezistenței statorice.

Din analiza celor trei grafice se poate observa că influența acestui parametru în regimul ante-perturbație este nesemnificativă. Totuși în regim tranzitoriu apare o creștere a valorii curenților și a puterii active, în situația în care rezistența statorică scade ca valoare. Se constată însă, că o variație semnificativă a rezistenței statorice produce o variație relativ mică a mărimilor electrice.

Modificarea inductivității sincrone

În Fig.5.18 se prezintă variația curenților și a puterilor absorbite de la rețea în cazul în care apare o modificare a valorii inductanței sincrone. Creșterea inductanței sincrone a condus la o scădere a valorii curentului pe fază. Dacă se analizează curbele puterii active și reactive absorbite, se poate observa că puterea activă se amortizează mai repede dacă inductivitatea sincronă crește. În schimb

apare o variație a puterii reactive în sensul de creștere a acesteia când inductivitatea scade. Prin urmare creșterea curenților pe faze se datorează componentei reactive a acestora.

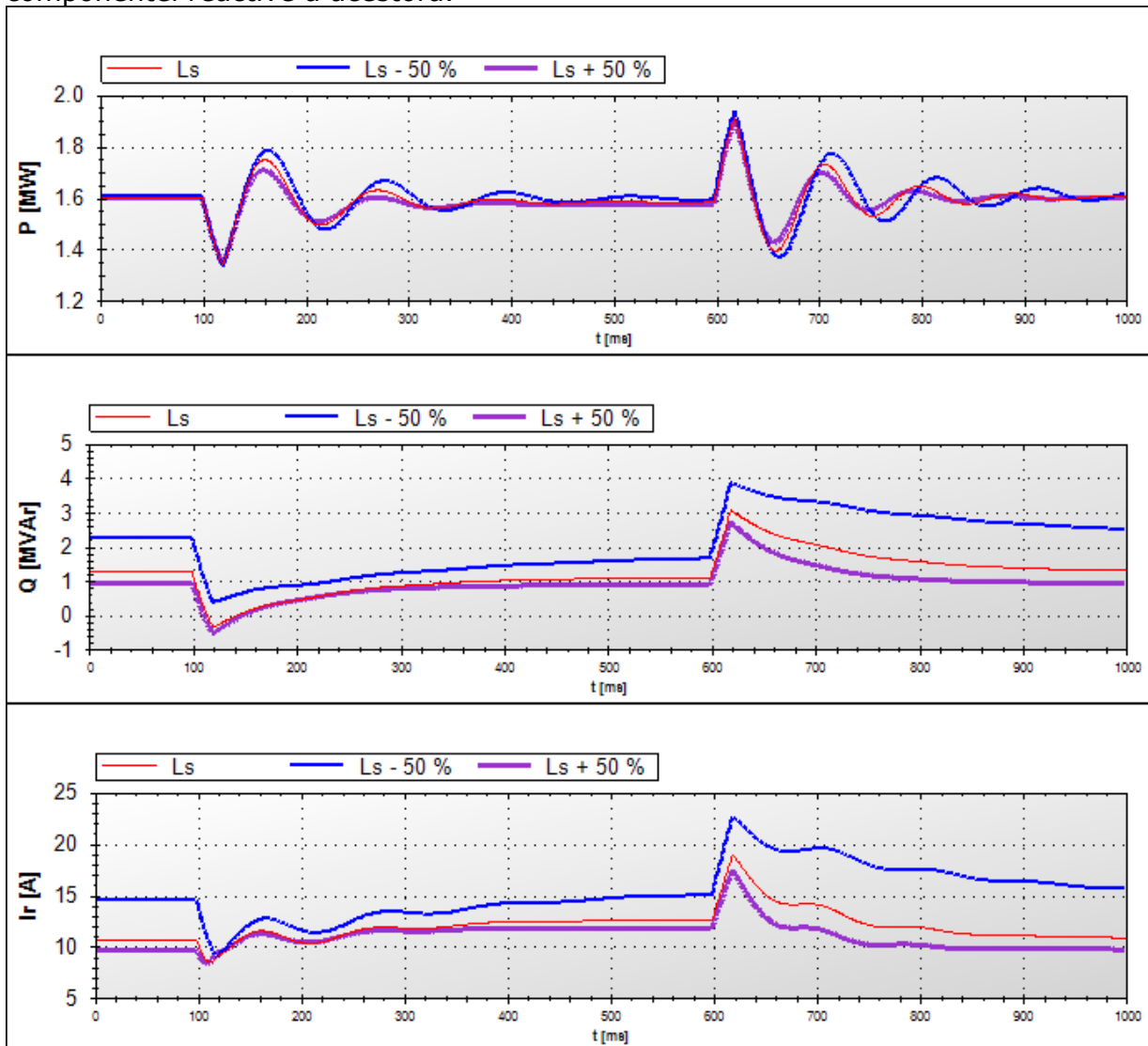


Fig.5.18. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii inductivității sincrone.

Se poate observa că valoarea inductanței sincrone se poate determina din regimul stabilizat ante-perturbație. Diferența valorilor curenților pe faze și a puterii reactive care apar în regimul ante-perturbație se păstrează aproximativ identic și pe durata perturbației.

Modificarea inductivităților tranzitorii

În Fig.5.19 se prezintă variația curenților și puterilor absorbite de la rețea datorită modificării valorii inductivităților de dispersie ale mașinii asincrone echivalente.

Din analiza graficelor se poate constata că o creștere a inductivității tranzitorii conduce la o scădere a valorilor de vârf a puterii active și o creștere a vitezei de amortizare a componentei aperiodice a acesteia. Totodată se observă că

diminuarea valorii puterii reactive în momentul apariției golului de tensiune este mai mică, iar valoarea la care revine aceasta pe durata golului este mai mare.

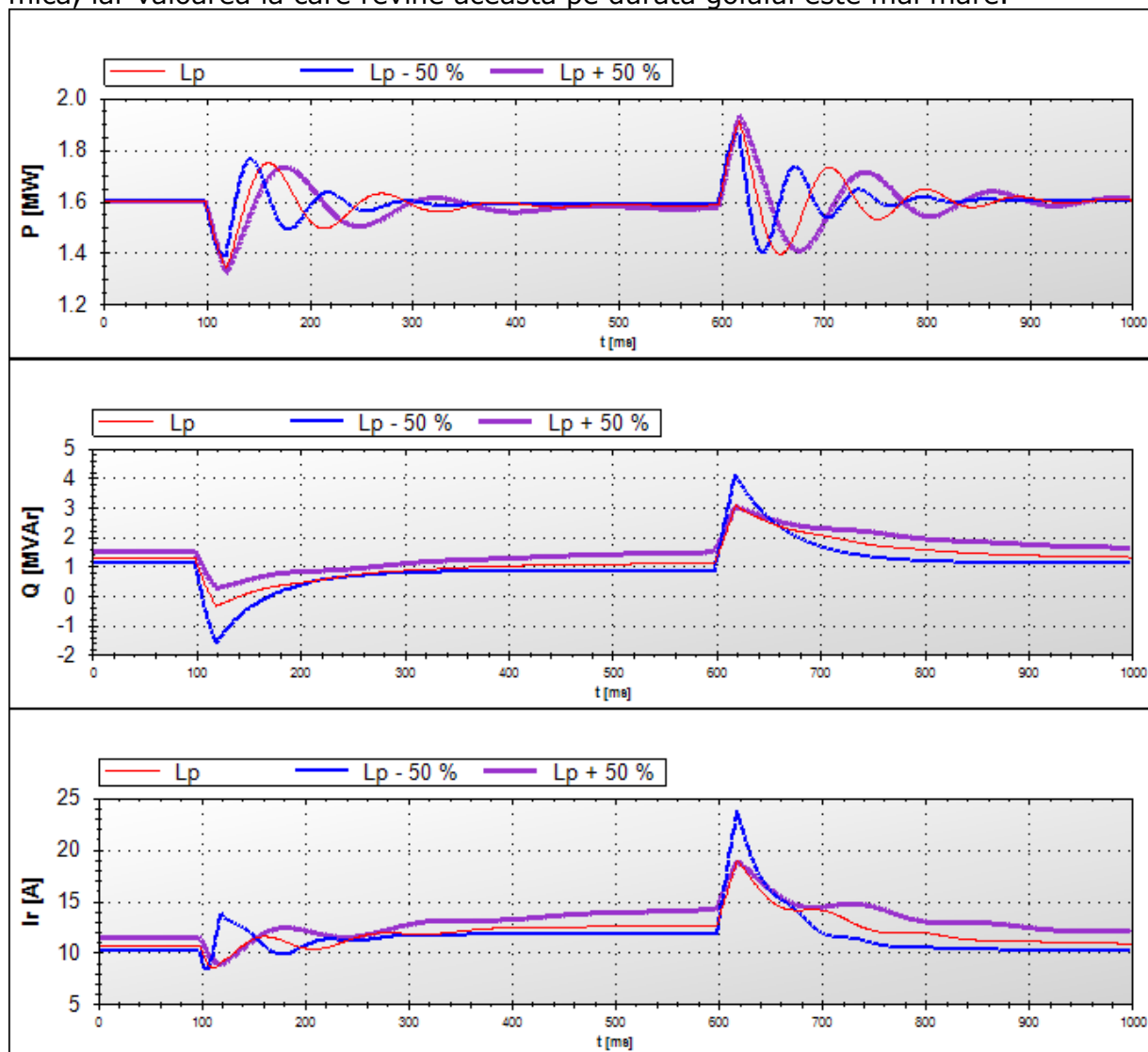


Fig.5.19. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii inductivităților tranzitorii.

Din graficul puterii reactive se observă că valorile inductivității tranzitorii modifică foarte puțin puterea cerută în regimul ante-perturbație. În final se observă că pentru inductivități tranzitorii mai mici se obțin vârfuri de curent mai mari.

Modificarea constantei de timp electrice (rezistenței rotorice)

În Fig.5.20 se prezintă variația curentilor și puterilor absorbite de la rețea datorită modificării valorii rezistenței rotorice ale mașinii asincrone echivalente.

Se poate observa că în situația în care constanta de timp electrică crește, se va obține o amortizare mai rapidă a componentei aperiodice a puterii active și implicit a curentilor pe faze. Din graficul puterii reactive se observă că și aceasta are o creștere mai lentă spre valoarea la care se stabilizează pe durata golului de tensiune. Prin urmare putem spune că durata de amortizare a componentelor aperiodice ale mărimilor electrice este determinată de constanta de timp electrică.

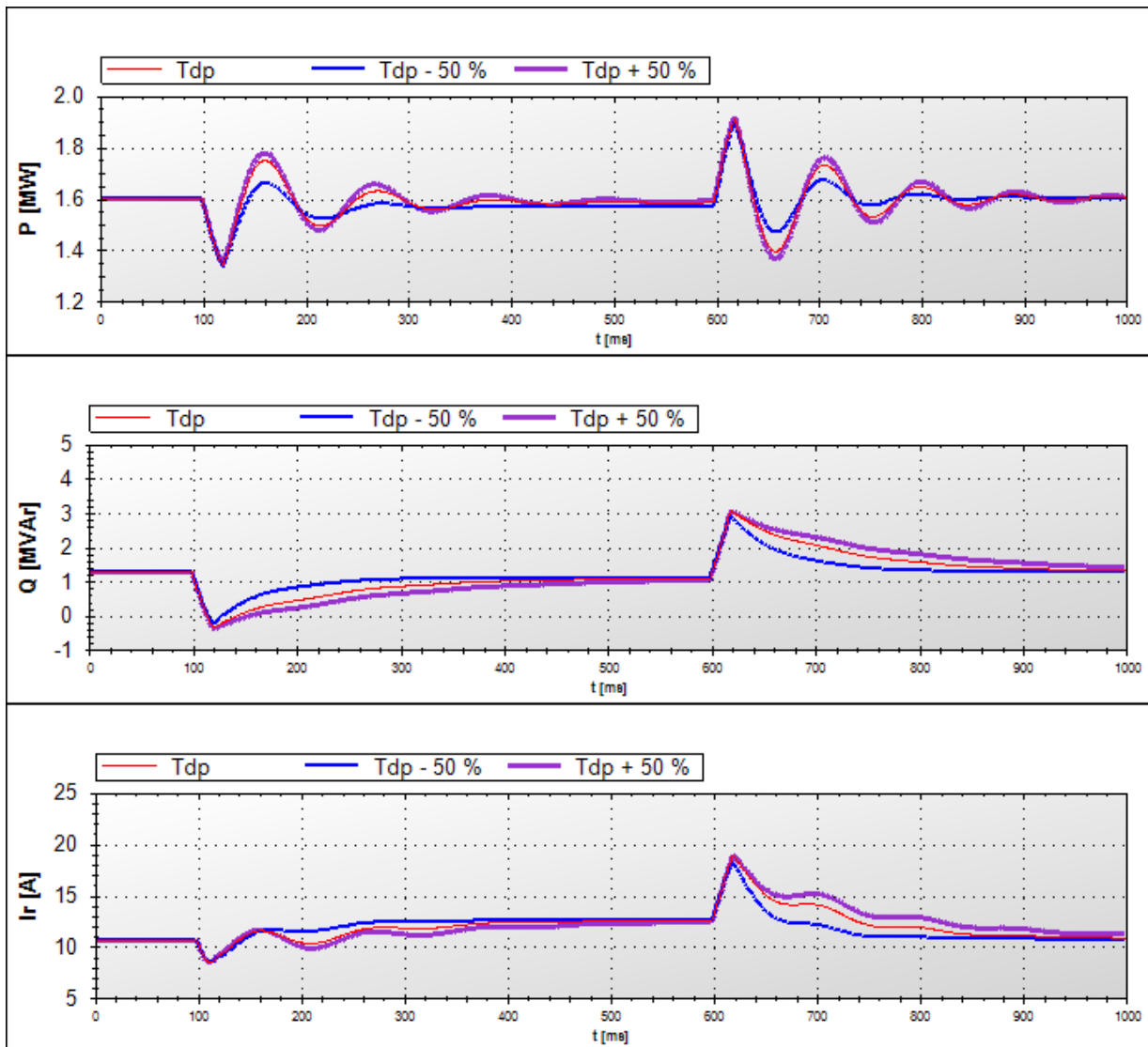


Fig.5.20. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii constantei de timp electrice.

Modificarea constantei de timp mecanice

Dacă se ia în considerare variația constantei de timp mecanică a motorului, se poate observa că aceasta nu intervine în regimul ante-perturbație, și nu influențează nici valorile de vârf a curentilor și a puterilor. Influența ei se vede în valoarea frecvenței oscilațiilor datorate perturbațiilor. Astfel dacă valoarea constantei de timp mecanice crește, va scădea frecvența de oscilație. Din Fig.5.21 se poate observa că o creștere cu 50% a valorii constantei de timp mecanice a condus la o scădere a frecvenței de oscilație cu aproximativ 20%.

Din cele expuse mai sus rezultă că inductivitatea sincronă, cât și rezistența statorică, se pot determina fără probleme din regimul ante-perturbație. În schimb, rezistența rotorică, inductivitatea tranzitorie, cât și constanta de timp mecanică trebuie determinate din regimul perturbator, adică regimul de gol de tensiune.

Inițializarea parametrilor se face prin încercări repetitive care să conducă la o cât mai bună apropiere a rezultatelor obținute de cele înregistrate. Această apropiere se urmărește vizual pe graficele generate.

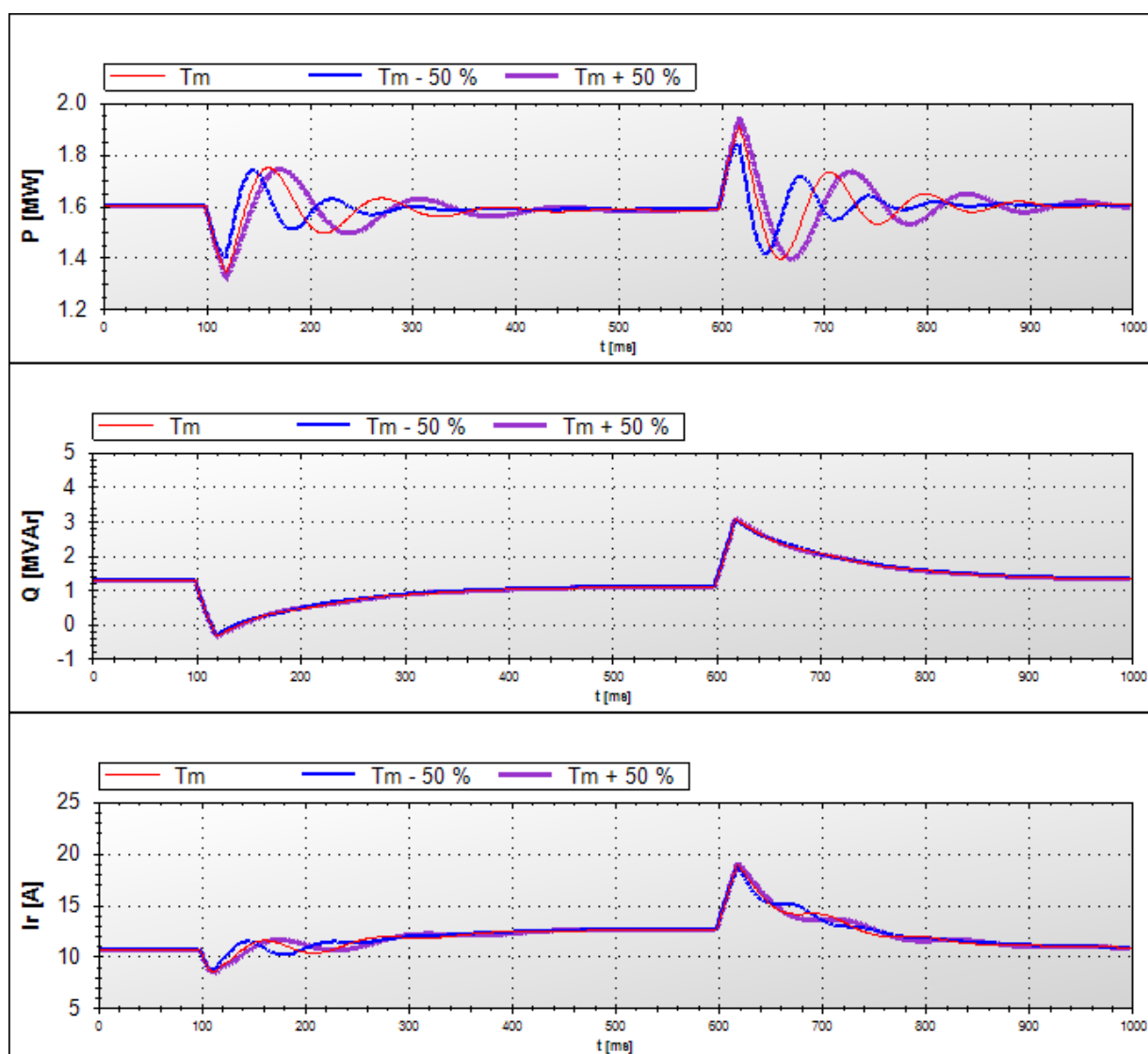


Fig.5.21. Variația puterii active (a), puterii reactive (b) și a curentului pe o fază (c) datorită modificării valorii constantei de timp mecanice.

După inițializarea parametrilor se aplică MCMMP, pornind de la identificarea inductivităților de dispersie statorică și rotorică, inductivitatea mutuală cât și rezistența statorică din regimul ante-perturbație, după care se estimează rezistența rotorică și constanta de timp mecanică din regimul perturbator.

Dacă nu se realizează o estimare acceptabilă a parametrilor se estimează din nou inductivitățile, pentru că scăderea inductivității mutuale poate fi compensată de o creștere a inductivităților de dispersie, dar care conduce la o modificare a constantei de timp electrice și deci la o nouă estimare a rezistenței rotorice.

5.7. Concluzii și contribuții

În acest capitol s-a urmărit dezvoltarea unui model matematic care să poată fi utilizat pentru analiza comportării consumatorilor complecși la perturbații de tip gol de tensiune. În primă instanță s-a considerat că un consumator complex poate fi

considerat ca fiind compus din două componente: una statică care echivalează consumatori statici, și una dinamică care echivalează mașinile rotative din sistem.

Totodată s-a arătat că, există trei posibilități prin care poate fi reprezentată componenta statică, din care pentru cazul studiat în această lucrare s-a ales reprezentarea sa prin admitanță constantă.

Pentru componenta dinamică, s-a dezvoltat un model matematic bazat pe un motor de inducție pornind de la principiul că în general ponderea mai mare în cadrul consumatorilor rotativi o reprezintă motorul de inducție.

În următoarea etapă s-a trecut la determinarea caracteristicilor dinamice ale motorului de inducție, după care acestea au fost echivalate pentru motorul de inducție echivalent ce caracterizează componenta dinamică a CC.

Cu toate acestea cunoscute s-a determinat un model matematic cât mai simplist, care să poată fi implementat ușor și care să furnizeze informații cu o viteză de calcul cât mai crescută, fără însă a pierde din informațiile vitale pentru descrierea fenomenului analizat.

Modelul matematic dezvoltat a fost ulterior validat prin compararea cu un model matematic consacrat. S-a arătat că sunt câteva diferențe între rezultatele obținute cu cele două modele, dar aceste diferențe nu prezintă o mare importanță în analiza perturbației de tip gol de tensiune. În plus, datorită vitezei de calcul, modelul matematic dezvoltat se pretează la analize mai laborioase, dintre care amintim posibilitatea rapidă de analiză a efectelor modificării parametrilor golului de tensiune, asupra consumatorului complex.

În finalul capitolului s-a prezentat o aplicație la care poate fi utilizat modelul matematic dezvoltat. Această aplicație se referă la estimarea parametrilor motorului de inducție echivalent, pentru un consumator complex real, pe baza identificării experimentale. Această aplicație este foarte utilă, în special în situațiile în care se dorește compararea rezultatelor obținute prin simulare, cu cele obținute din înregistrarea curbelor de tensiune și curent pe durata perturbațiilor reale. Practic dacă avem o achiziție de date care să conțină mărimile de intrare (tensiune și frecvență) și mărimile de ieșire (curenți și puteri), se poate determina parametrii echivalenți ai consumatorului complex, prin estimare experimentală.

În concluzie putem afirma că modelul matematic dezvoltat se pretează la analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor complecși.

Contribuțiile personale din acest capitol sunt:

- elaborarea unui model matematic complet al unui consumator complex, care să poată fi utilizat la analiza efectelor golurilor de tensiune asupra acestuia;
- dezvoltarea, în programul Simulink din mediul MATLAB, a unei aplicații de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex;
- validarea modelului matematic dezvoltat prin compararea rezultatelor obținute pentru o perturbație dată, cu cele obținute cu un alt model matematic consacrat și general acceptat (MATLAB);
- identificarea și expunerea unei aplicații suplimentare dar foarte utile, la care poate fi utilizat modelul matematic dezvoltat, și anume estimarea parametrilor unui consumator complex;
- am determinat ordinea optimă de estimare a parametrilor motorului echivalent, dar și o procedură de inițializare a parametrilor, două lucruri foarte importante în realizarea convergenței metodei celor mai mici pătrate forma generalizată, folosită pentru estimarea parametrilor consumatorului complex.

6. ANALIZA EFECTELOR GOLURILOR DE TENSIUNE ASUPRA CONSUMATORILOR DE SISTEM

Capitolul este dedicat dezvoltării unei metode de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex. Pentru dezvoltarea acestei metode s-a pornit de la concluziile și modelele matematice dezvoltate în capitolele anterioare. Suplimentar pentru validarea rezultatelor obținute, acestea sunt comparate cu situații reale, înregistrate la bornele consumatorului complex luat în considerare. Pentru a se putea compara rezultatele simulate cu cele înregistrate într-o situație reală este necesar prelucrarea semnalelor înregistrate pentru a fi aduse la o formă convenabilă procedurii de comparare. În finalul capitolului se prezintă rezultatele obținute cu ajutorul algoritmului de analiză propus. Pe întreg parcursul capitolului sunt prezentate componentele unui pachet de programe care au drept scop realizarea pas cu pas, a tuturor etapelor propuse de algoritmul dezvoltat.

6.1. Introducere în metoda de analiză

Analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem, presupune obținerea răspunsului la câteva întrebări:

- ce trebuie să știm despre golurile de tensiune?
- ce trebuie să știm despre consumatorii de sistem?
- cum analizăm efectele golurilor de tensiune?
- cum verificăm dacă rezultatele obținute sunt corecte?

Astfel, răspunsul la întrebarea privind cunoștințele necesare despre golurile de tensiune, se regăsește pe întreg capitolul 4 al acestei lucrări. În ceea ce privește a doua întrebare, și anume informațiile despre consumatorii de sistem, răspunsul este dat în capitolul 5 al acestei lucrări. Din punct de vedere a metodei de analiză a efectelor golurilor de tensiune, se propune trasarea unor grafice tridimensionale care să prezinte valorile maxime ale curenților ce pot apărea pe fazele consumatorului de sistem, la diferite perechi durată-amplitudine a golului de tensiune. În final răspunsul la ultima întrebare se obține prin generarea curbelor curenților pe faze precum și a puterilor activă și reactivă, pentru perechi durată-amplitudine cunoscute, și pentru care există înregistrări la bornele consumatorului de sistem. Rezultatele obținute prin simulare se compară cu valorile obținute prin înregistrare.

În acest sens se propune realizarea unui pachet de programe de analiză, care să trateze pe rând etapele necesare pentru rezolvarea acestei probleme. Astfel, pachetul trebuie să conțină mai multe programe cu funcții diferite, cum ar fi:

- un program (denumit *Evenimente*) de prelucrare a bazelor de date existente pentru a se obține una singură, care să aibă un format cât mai simplu;
- un program (denumit *Prelucrare Date*) care să prelucreze măsurătorile achiziționate, care se regăsesc în baza de date creată;

- un program (denumit *Identificare*) care să determine caracteristicile consumatorului de sistem analizat, în cazul în care aceste nu se cunosc (algoritmul este prezentat în paragraful 5.6);
- un program de simulare a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex denumit *MAS* (algoritmul este prezentat în paragraful 5.4);
- un program care să compare rezultatele obținute prin măsurători cu cele obținute prin simulare (opțional dar obligatoriu pentru cazul în care se realizează identificarea parametrilor consumatorului de sistem cu algoritmul prezentat în capitolul 5).

Fiecare dintre programele ce au fost realizate au un scop precis. Astfel, pentru a analiza efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem, se pornește de la obținerea unui set de măsurători, realizate la bornele consumatorului echivalent ce va fi analizat, măsurători care conțin curbele de tensiune și de curent înregistrate pe durata unuia sau a mai multor goluri de tensiune. Cu ajutorul programului *Evenimente*, fișierele cu măsurători vor fi convertite într-un format internațional pentru a fi mai ușor de prelucrat. Programul *Prelucrare Date*, poate citi fișierul în format internațional, și are drept scop prelucrarea datelor obținute prin măsurători astfel încât să se obțină toate informațiile necesare cum ar fi: variația în timp a tensiunii efective și a curentului efectiv, obținerea caracteristicilor golurilor de tensiune, determinarea variației în timp a puterilor activă și reactivă, etc. Programul *Identificare* care este opțional, are ca scop determinarea caracteristicilor consumatorului de sistem, în cazul în care acestea nu se cunosc. Program *MAS* (cel mai important), este programul care efectuează analiza efectelor golurile de tensiune asupra consumatorului complex. În final ultimul program, a fost dezvoltat pentru a se putea realiza o comparație mai ușoară între datele obținute prin simulare și cele obținute din măsurători reale. Acest program de final este opțional deoarece comparația rezultatele se poate face și cu metode tradiționale.

Programarea se realizează cu ajutorul limbajul de programare Microsoft Visual C# [***C#1], [***C#2], [***C#3], [Ciocârlie2007a], [Ciocârlie2007b], [Crețu2000], [Crețu2006], [Jian2001], [Powers2006], [Schach2006], [Sharp2005].

6.2. Realizarea bazei de date unice

Pentru a se realiza o analiză a măsurătorilor din sistemul electroenergetic, este necesar obținerea măsurătorilor în diferite puncte de monitorizare a sistemului. Acest lucru nu este foarte dificil deoarece în ultimii ani, companiile de transport și distribuție a energiei electrice au echipat treptat stațiile de transformare (în special cele de la nivele de tensiune înaltă), cu echipamente de monitorizare tot mai performante. Un dezavantaj al dezvoltării treptate este faptul că informațiile sunt salvate în diverse formate de fișiere, deoarece fiecare producător de echipamente de monitorizare și-a dezvoltat și propriul soft de analiză, ceea ce a condus la salvarea informațiilor în formate specifice personale. Bineînțeles, acest lucru este ușor de înțeles, deoarece dacă achiziționezi un echipament de monitorizare de la un anumit producător, apare obligația de a achiziționa și programul de analiză de la același producător. În plus, la noi achiziții de aparate de monitorizare, apare tendința de a cumpăra de la același producător pentru a înlătura cheltuielile cu achiziționarea unui nou program de analiză.

Totuși, în standardul IEEE1159 [IEEE1159], se prezintă atât câteva criterii de organizare a fișierelor, cât și metode de prelucrare a măsurătorilor pentru obținerea informațiilor ce caracterizează mărimile electrice.

Din cele prezentate anterior, rezultă necesitatea realizării unei baze de date unice, iar în acest scop a fost dezvoltat un program denumit „Evenimente” (Fig.6.1).

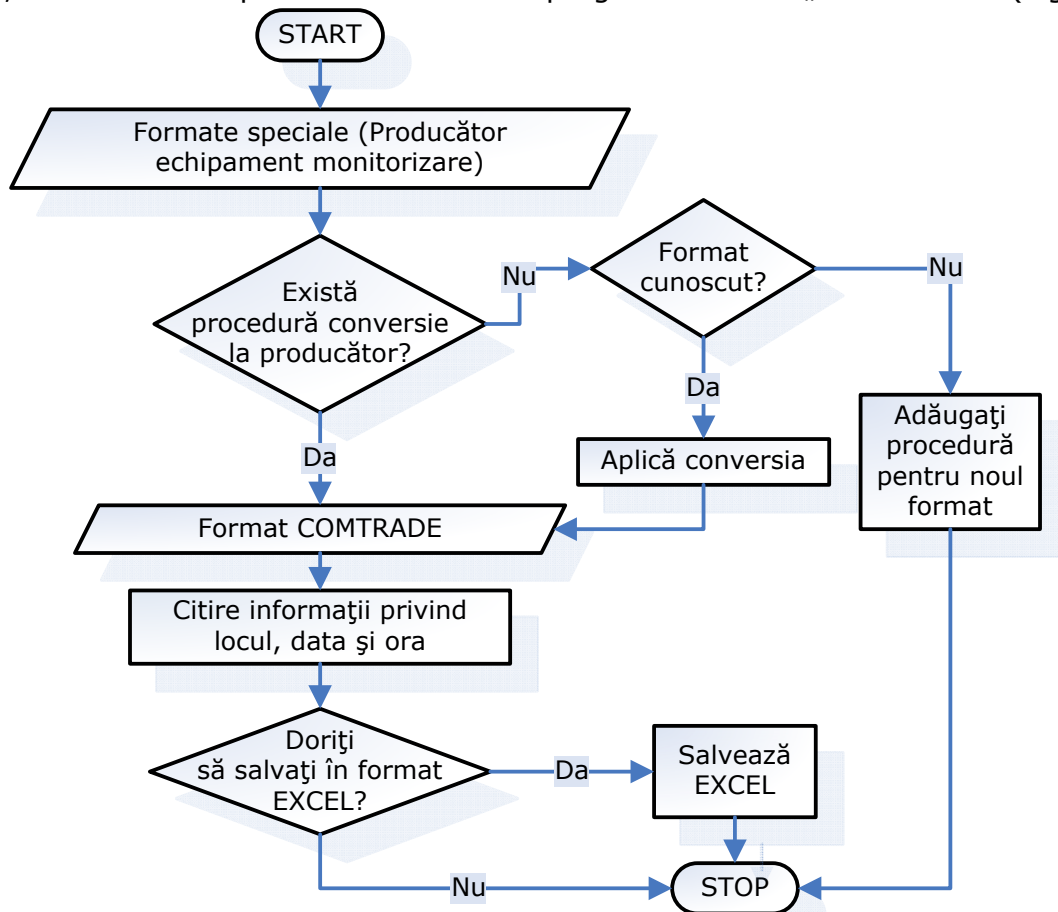


Fig.6.1. Algoritmul programului „Evenimente” pentru realizarea bazei de date.

La realizarea programului, s-a pornit de la precizările standardelor [C37.111-1991], [C37.111-1999], care au propus stabilirea unui protocol internațional de organizare a fișierelor ce conțin înregistrări realizate în sistemele electroenergetice. Acest protocol poartă numele de COMTRADE (*COM*mon *form*at for *TR*ansient *D*ata *E*xchange), și presupune împărțirea informației în trei fișiere:

- Header File (*.HDR): reprezintă fișierul de antet, care conține informații generale despre evenimentul înregistrat;
- Configuration File (*.CFG): este un fișier de configurări care conține informații despre fiecare canal de înregistrare;
- Data File: (*.DAT): fișier de date care conține datele obținute prin achiziționare.

În general, pentru majoritatea analizelor sunt suficiente informațiile din ultimele două fișiere. Astfel fișierul de configurare conține mai multe câmpuri, după cum urmează (Anexa IV, Fig.A3.1):

- primul câmp conține informații despre locul unde s-a realizat înregistrarea;
- al doilea câmp este format din mai multe linii, iar fiecare linie conține denumirea mărimii electrice înregistrate, unitatea de măsură, factorul de

amplificare a valorilor din fișierul de date, domeniul în care poate să ia valori datele din fișierul de date și alte informații utile;

- ultimul câmp conține data și ora începerii evenimentului.

Fișierul de date (Anexa IV, Fig.A3.2) conține datele achiziționate, separate prin *virgulă*, iar dimensiunea lui depinde de numărul de mărimi monitorizate, frecvența de eșantionare a semnalului și durata de înregistrare.

Din cele prezentate mai sus s-a ajuns la concluzia că cel mai recomandat mod de organizarea a fișierelor este protocolul COMTRADE. Astfel, la realizarea bazei de date s-a pornit de la principiul că orice fișier trebuie să fie convertit în format COMTRADE, iar toate programele ce vor fi dezvoltate ulterior trebuie să preia informația din acest tip de fișiere.

Programul „*Evenimente*” are trei componente, și anume:

- o transformarea oricărui fișier de date în format COMTRADE;
- o realizarea unei evidențe în ceea ce privește conținutul fiecărui fișier (locul unde s-a realizat achiziția, data și ora la care s-a realizat achiziția);
- o convertirea fișierelor COMTRADE în alte formate, mai comun utilizate, cum ar fi EXCEL din pachetul de programe Microsoft Office.

Pentru transformarea fișierelor din formate speciale în format COMTRADE, există două modalități: fie producătorul a implementat în programul realizat de el o procedură de convertire a fișierului în format COMTRADE, fie producătorul pune la dispoziție utilizatorului protocolul pe care la utilizat în realizarea fișierului special. Pentru a doua situație, programul de realizare a bazei de date conține o procedură de transformare a fișierului special în fișier COMTRADE. Bineînțeles dacă apar protocoale noi, acestea trebuie implementate software și încadrate în programul deja dezvoltat. În Anexa V, se prezintă două programe ale producătorilor de aparate de monitorizare care au implementat funcția de conversie în format COMTRADE.

În a doua etapă, se citește din fișierele COMTRADE nou formate, informațiile privind locul de monitorizare, precum și data și ora înregistrării, pentru a fi înglobate în baza de date. În final, din program se poate selecta un anumit eveniment care se găsește într-un fișier COMTRADE, iar apoi acesta poate fi convertit în format EXCEL. În Anexa VI sunt prezentate câteva capturi din programul *Evenimente*.

6.3. Algoritm pentru prelucrarea datelor înregistrate

Prelucrarea datelor este o problemă destul de complexă apărută odată cu tehnica modernă de măsurare a mărimilor electrice. În primele variante de analiză a fenomenelor tranzitorii, acestea se înregistrau grafic pe hârtie cu aparate numite osciloperturbografe. Ulterior, odată cu apariția tehnologiei digitale, s-au realizat aparate de monitorizare cu funcții de înregistrare digitală a perturbațiilor apărute. Acest lucru a condus la dezvoltarea unor teorii specifice privind modul de obținere a parametrilor ce caracterizează mărimile analogice, înregistrate sub formă digitală.

În literatura de specialitate se întâlnesc mai multe tehnici pe prelucrare a datelor în general prezentate ca și soluții generale. În plus, pentru analiza golurilor de tensiune s-au dezvoltat câteva tehnici specifice de prelucrare a datelor [Naidoo2007], [Perez2008], [Villiers2008], [Gencer2009], [Sushama2009].

Astfel, prelucrarea datelor obținute din înregistrări presupune urmărirea câtorva pași (Fig.6.2): citirea datelor din fișiere COMTRADE, prelucrarea datelor, segmentarea, determinarea mărimilor electrice pe segmente și afișarea rezultatelor. Pe baza acestui algoritm s-a realizat programul denumit „*Prelucrare Date*”.



Fig.6.2. Algoritmul programului „Prelucrare Date”.

Prima etapă pornește de la baza de date prezentată anterior, prin selectarea evenimentului care ne interesează a fi analizat. Programul de prelucrare a datelor este astfel conceput încât se poate selecta mai multe evenimente, înregistrate la bornele aceluiași consumator echivalent, acestea fiind prelucrate pe rând, iar apoi salvate într-un fișier pentru a putea fi apoi încărcate în programele de analiză.

6.3.1. Prelucrarea curbelor înregistrate

În cazul mărimilor analogice, datele din fișierele COMTRADE, reprezintă valori momentane, ale acestor mărimi. Numărul valorilor momentane înregistrate, depinde de frecvența de eșantionare și de durata pe care s-a realizat achiziția. În continuare se va considera termenul „semnale” pentru a ne referi la aceste valori momentane înregistrate.

În decursul anilor s-au realizat mai multe metode de prelucrare a semnalelor. În domeniul calității energiei electrice una dintre primele metode utilizate la scară largă, a fost determinarea valorilor efective, la un moment de timp, utilizând una dintre relațiile (4.1) sau (4.2). Totuși această metodă cu toate că oferă câteva avantaje majore cum ar fi viteză mare de calcul și necesar de memorie de stocare a informației mai scăzut, ea are și câteva dezavantaje, dintre care se amintesc determinarea mai lentă a momentului în care apare un eveniment, precum și pierderea informațiilor despre defazajele dintre tensiuni, respectiv dintre curenți.

O altă metodă foarte utilizată la momentul actual, este trecerea semnalului din domeniul „timp” în domeniul „frecvență”, cu ajutorul unei metode din familia transformatei Fourier.

În această lucrare s-a ales ca metodă de prelucrare a semnalelor, transformata Fourier discretă (DFT) care va fi prezentată în continuare.

În literatura de specialitate DFT se regăsește în mai multe forme. Forma discutată în această lucrare este *DFT reală*, denumire care provine de la faptul că operează cu numere reale. Ea este definită de relațiile (6.1) [Smith2002].

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Re} U_k &= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u[i] \cdot \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \\
 \operatorname{Im} U_k &= -\frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u[i] \cdot \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right)
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

unde:

$\operatorname{Re} U_k$ – componenta reală a tensiunii pentru armonica k ;

$\operatorname{Im} U_k$ – componenta imaginară a tensiunii pentru armonica k ;

N – numărul de eșantioane existente în perioada pe care se face analiza;

k – numărul de ordine al armonicii considerate, care este mai mic decât $N/2$.

Din relația (6.1) se poate determina orice formă convenabilă de reprezentare, cum ar fi:

- număr complex:

$$\underline{U}_k = \text{Re} U_k - j \text{Im} U_k \quad (6.2)$$

- coordonate polare:

$$U_k = \sqrt{\text{Re} U_k^2 + \text{Im} U_k^2} \quad \theta_k = \text{atan} \left(\frac{\text{Im} U_k}{\text{Re} U_k} \right) \quad (6.3)$$

O a doua formă care se utilizează foarte des în analiza semnalelor este forma *complexă* a DFT, care este definită de relația (6.4) [Smith2002].

$$\underline{U}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \underline{u}[i] e^{-j2\pi ki/N} \quad (6.4)$$

Principalul avantaj al acestei variante este acela că semnalul prelucrat poate fi exprimat sub formă complexă. Un alt avantaj foarte mare este acela că numărul de ordine al armonicii poate să ia valori până la $N-1$ (spre deosebire de forma reală în care poate lua valori până la $N/2$), cu precizarea că de la 0 la $N/2$ sunt determinate frecvențele pozitive și de la $N/2$ la $N-1$ sunt determinate frecvențele negative.

6.3.2. Segmentarea

Algoritmul propus pentru determinarea caracteristicilor golurilor de tensiune, are la bază ideea de segmentare. *Segmentarea* reprezintă procedeul prin care o undă de mărime analogică achiziționată este împărțită în mai multe blocuri de date, fiecare bloc având anumite caracteristici. Spre exemplu pentru un gol de tensiune trifazat dreptunghiular, în urma segmentării se obțin cinci segmente. Primul segment reprezintă perioada ante-perturbație. Al doilea segment reprezintă perioada de tranziție în care tensiunea scade de la valoarea nominală la valoarea golului de tensiune, segmentul numărul trei reprezintă perioada golului de tensiune, segmentul numărul patru este perioada în care tensiunea revine de la valoarea golului la valoarea nominală și în final al cincilea segment reprezintă perioada înregistrată post-perturbație.

Din exemplu de mai sus reiese că un eveniment care apare la un moment dat într-o rețea electrică este caracterizat de segmentul obținut între două segmente de tranziție consecutive, de unde rezultă că primul pas în realizarea segmentării este determinarea locului de unde încep segmentele de tranziție.

În literatura de specialitate există mai multe metode de realizare a segmentării. Dintre acestea cele mai utilizate sunt [Bollen2006]:

- utilizarea filtrelor Kalman pentru modelele sinusoidale;
- utilizarea modelelor autoregresive;
- estimarea cu ajutorul amplitudinilor sau a valorilor efective;
- utilizarea diferitelor metode de descompunere a curbelor de tensiune.

În această lucrare s-a ales ca și metodă de segmentare, estimarea cu ajutorul valorilor efective a tensiunilor. Această metodă este mult mai practică deoarece segmentarea se poate face doar cu ajutorul informațiilor extrase direct din curbele înregistrate. În plus are avantajul că se poate face o segmentare și a informațiilor extrase de la aparate de măsură care au fost setate să înregistreze doar valoarea efectivă a semnalelor analogice, setare realizată pentru a reduce necesarul de memorie.

Pentru realizarea segmentării cu această metodă, se pornește de la determinarea valorilor efective, la anumite momente de timp cu relații de tipul (4.1) sau (4.2). Se poate observa că variațiile de tensiune în timp sunt mai mari dacă se aplică relația (4.2), dar în schimb se pot obține segmentări eronate, datorită oscilațiilor care apar (vezi Fig.4.1). În această lucrare s-a ales determinarea valorilor efective a tensiunilor la diferite momente de timp, prin utilizarea relației (4.1).

Algoritmul de segmentare are la bază determinarea unui indice denumit *indice de schimbare* (M_{ef}), care reprezintă diferența dintre două valori (în cazul de față – valori efective) ale semnalului obținute la două momente de timp consecutive. Algoritmul conține trei pași.

a) *determinarea ratei de reducere a numărului de eșantioane* pentru evaluarea valorilor efective ale tensiunii. Mai sus s-a precizat că valoarea efectivă calculată pe o perioadă a frecvenței fundamentale are o rezoluție în timp mai crescută, ceea ce înseamnă că diferența dintre două valori consecutive este relativ mică. În acest sens se propune identificarea unei noi valori efective $U_{ef}(\tilde{t}_k)$ la momentul \tilde{t}_k , în care:

$$\tilde{t}_k = \frac{t_k}{m} \quad (6.5)$$

unde m reprezintă o rată care se alege empiric.

b) *calculul indicelui de schimbare*, prin efectuarea diferenței dintre valorile efective la două momente de timp succesive \tilde{t}_k , dată de relația (6.6).

$$M_{ef}^i(\tilde{t}_k) = \left| U_{ef}^i(\tilde{t}_k) - U_{ef}^i(\tilde{t}_{k-1}) \right| \quad (6.6)$$

unde $i=a,b,c$ reprezintă indicii diferitelor faze. În cazul unui sistem trifazat indicele de schimbare se determină cu relația (6.7).

$$M_{ef}(\tilde{t}_k) = \max\left(M_{ef}^a(\tilde{t}_k), M_{ef}^b(\tilde{t}_k), M_{ef}^c(\tilde{t}_k)\right) \quad (6.7)$$

c) *determinarea segmentelor*, se face prin compararea mărimilor calculate la punctul anterior cu o valoare de prag δ .

$$\begin{aligned} M_{ef}(\tilde{t}_k) < \delta & \quad \text{segment de eveniment} \\ M_{ef}(\tilde{t}_k) \geq \delta & \quad \text{segment de tranziție} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Segmentul de tranziție începe când se determină prima valoare mai mare sau egală cu pragul și se sfârșește când se determină primul indice mai mic decât pragul stabilit.

În Fig.6.3 se prezintă procedeul de segmentare a golului de tensiune analizat în capitolul 4.

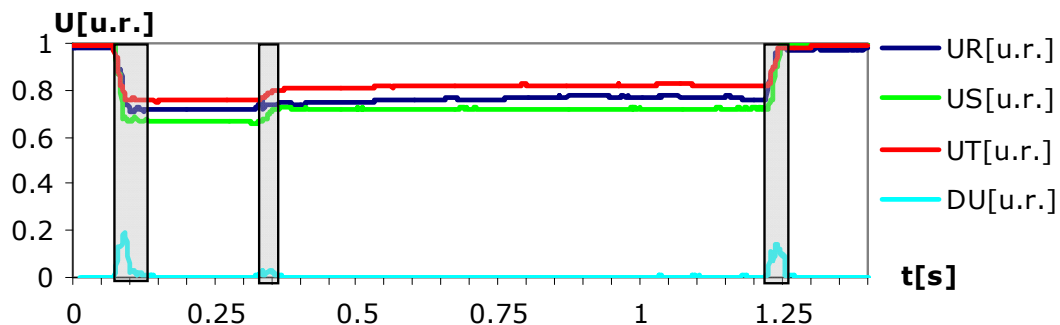


Fig.6.3. Procedeul de segmentare a unui gol de tensiune.

Pentru realizarea segmentării s-au calculat valorile efective în u.r., pe o perioadă a frecvenței fundamentale, s-a ales rata de creștere a rezoluției ca fiind $m=10$, pragul stabilit a fost $\delta=0.02u.r.$ Se observă că s-au obținut trei segmente de tranziție ceea ce a condus la ipoteza că evenimentul a fost în două trepte. Astfel primul segment este cel ante-perturbație, urmat de un segment de tranziție care începe la momentul $t=72ms$. Al treilea segment reprezintă un gol de tensiune la care tensiunea remanentă pe faza defectă este mai mică, și are o durată de $0.25s$. În continuare apare un alt segment de tranziție care conduce la o nouă treaptă a golului de tensiune, caracterizată de o tensiune remanentă puțin mai mare și o durată de $0.8s$ determinată de apariția celui de-al treilea segment de tranziție. Ultimul segment de pe grafic este segmentul post-avarie.

Din analiza segmentării se observă că s-a analizat un gol de tensiune în două trepte, prima treaptă de durată $0.25s$ și a doua de $0.8s$.

6.3.3. Determinarea mărimilor electrice pe segmente și salvarea datelor

În această etapă se realizează o procedură (Fig.6.4) pentru determinarea caracteristicilor de interes ale mărimilor electrice achiziționate.

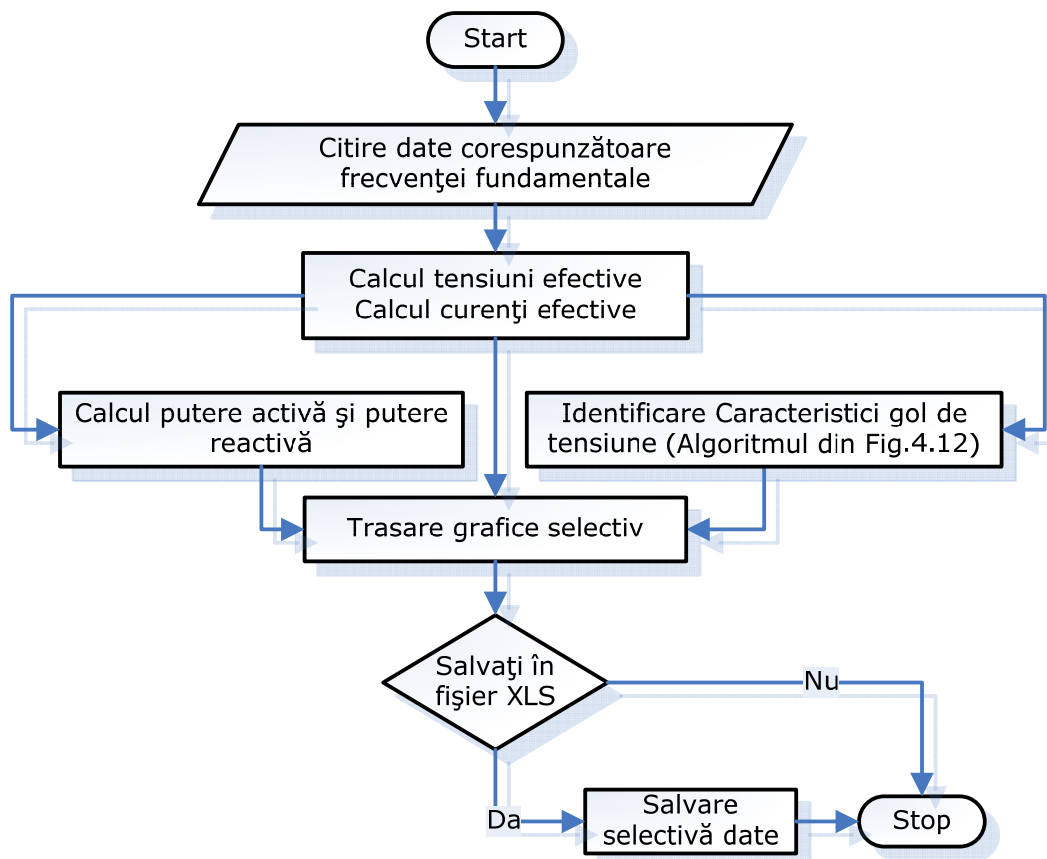


Fig.6.4. Algoritm pentru determinarea caracteristicilor mărimilor electrice de interes.

Caracteristicile de interes a mărimilor electrice achiziționate, conținute de algoritmul din Fig.6.4 sunt următoarele:

- valorile efective pentru tensiuni și curenți, obținute utilizând relația (4.1);
- tipul golului de tensiune, determinat utilizând metoda propusă în capitolul 4;
- durata și amplitudinea golului de tensiune, determinate utilizând tot metoda propusă în capitolul 4;
- valorile medii ale puterilor activă și reactivă pe durata înregistrărilor.

Toate aceste caracteristici sunt necesare în continuare pentru compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele înregistrate și dacă este cazul, acestea sunt obligatorii în procedura de identificare a consumatorului de sistem.

În finalul acestei proceduri se pot trasa graficele pentru valorile efective ale mărimilor electrice, respectiv pentru puterile activă și reactivă. Ulterior informațiile pot fi salvate selectiv în fișiere de tip XLS.

6.4. Procedura de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem

În paragrafele anterioare s-au prezentat pe rând programele componente ale pachetului de programe dezvoltate în scopul de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem. În continuare se va prezenta procedura (Fig.6.5) care trebuie urmată pentru realizarea studiului.

Procedura începe cu selectarea zonei de rețea ce urmează a fi analizată. În acest scop trebuie precizat că această procedură poate fi aplicată doar în cazul zonelor de rețea cu funcționare radială, care pot fi echivalate ca și consumatori de sistem.

După stabilirea zonei, se verifică dacă în punctul de echivalare există aparate de monitorizare capabile să achiziționeze curbele de tensiune și de curent în momentul apariției golurilor de tensiune. Dacă acestea nu există sau nu sunt capabile să înregistreze curbele de tensiune și de curent pe durata golurilor de tensiune, se vor monta aparate de monitorizare specializate în acest sens (spre exemplu osciloperturbografe). În general, la nivele de înaltă tensiune, circuitele din stațiile electrice sunt echipate cu protecții digitale care în general au și funcția de osciloperturbograf, în scopul de a se putea determina care au fost fenomenele care au condus la demararea protecției. Dacă există fișierele cu evenimente salvate, se poate trece la etapele de analiză. În schimb dacă aceste fișiere nu există, trebuie așteptat producerea golurilor de tensiune și salvarea câtorva evenimente. Trebuie precizat că dacă avem un număr de evenimente înregistrate mai ridicat, se poate obține o precizie mai bună atât la determinarea parametrilor consumatorului echivalent, cât și la compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele obținute din înregistrări.

Odată ce avem fișierele cu evenimente se poate trece la realizarea bazei de date, adică convertirea fișierelor în formatul COMTRADE și organizarea lor în funcție de data și ora la care au avut loc evenimentul corespunzător.

Cu baza de date realizată se trece la prelucrarea datelor din fiecare fișiere, care apoi sunt utilizate pentru determinarea caracteristicilor golului de tensiune care a avut loc. Pentru cazurile în care nu se cunoasc parametrii consumatorului de sistem analizat, aceștia se pot determina conform algoritmului din paragraful 5.6.

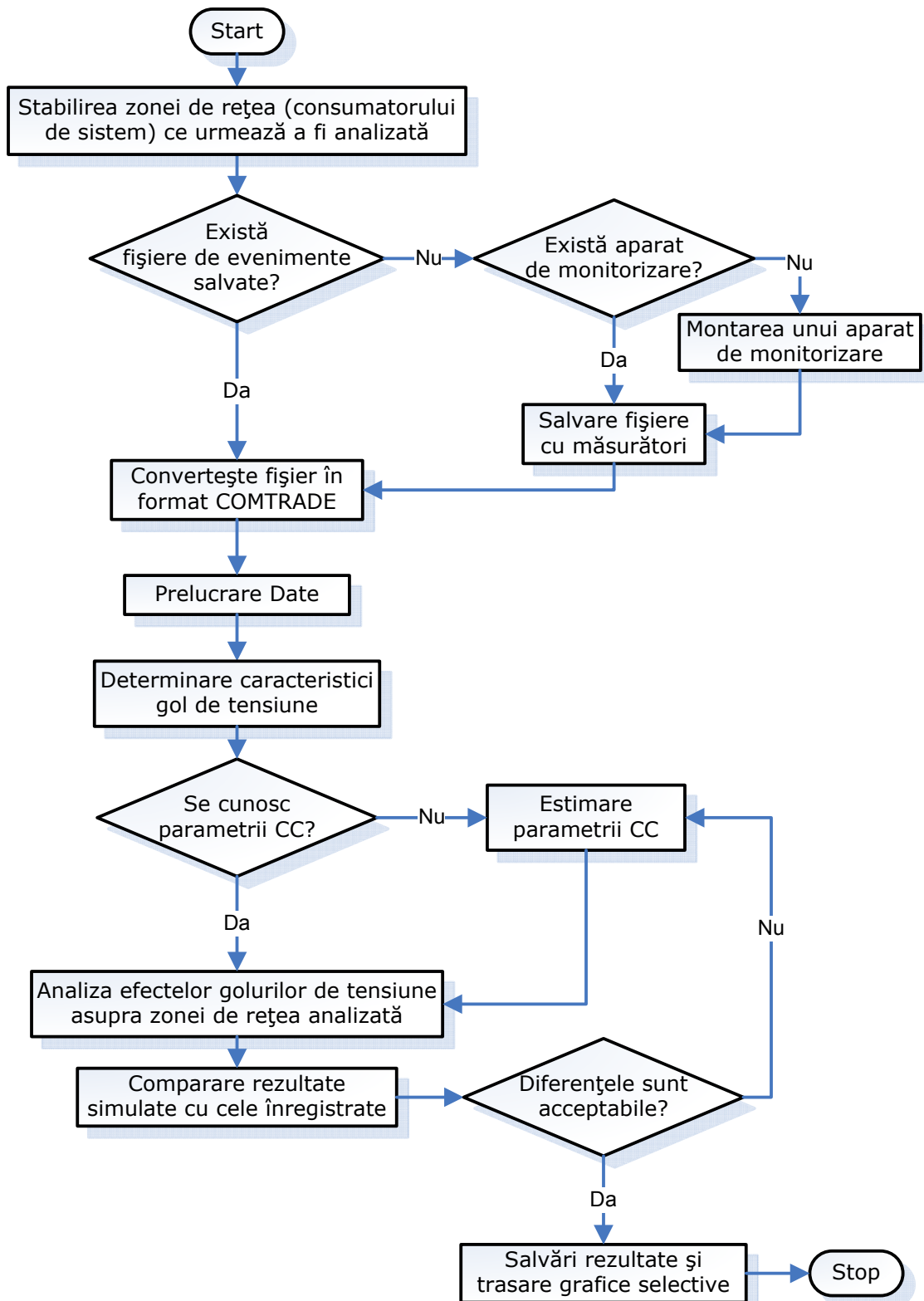


Fig.6.5. Procedură de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem

În momentul în care se cunosc parametrii consumatorului de sistem se poate trece la analiza efectelor golurilor de tensiune asupra zonei de rețea analizate. Din rezultatele obținute se pot selecta câteva cazuri care coincid din punct de vedere

al caracteristicilor golurilor de tensiune cu cele determinate prin măsurători. Aceste rezultate sunt comparate cu cele obținute din măsurători, iar dacă diferențele sunt mari se verifică corectitudinea de estimare a parametrilor consumatorului de sistem, după care se reia analiza. Dacă diferențele sunt mici se consideră că procedura a decurs corect, iar în final se salvează informațiile obținute sub formă de fișiere sau grafice.

Pe baza acestor fișiere și grafice se pot trage concluziile referitoare la efectul golurilor de tensiune asupra zonei de rețea analizate.

6.5. Studiu de caz

În acest paragraf se va realiza studiul de caz al unui consumator de sistem din sistemul electroenergetic românesc. Pentru realizarea acestui studiu de caz se va urmări pas cu pas procedura prezentată în Fig.6.5.

Scopul acestui studiu este acela de a demonstra funcționarea procedurii pentru cazuri reale.

6.5.1. Stabilirea zonei de rețea analizate și realizarea bazei de date

Pentru stabilirea zonei de rețea s-a pornit de la schema de funcționare a sistemului de transport a energiei electrice din partea de vest a țării. Pe această schema s-au identificat zonele de rețea care au o funcționare radială, deoarece, după cum s-a menționat anterior, doar acestea pot face obiectul studiului de față. În urma analizei acestei scheme de funcționare a sistemului de transport, s-au selectat mai multe zone care respectă această condiție obligatorie.

Deoarece acest capitol are drept scop, prezentarea unui exemplu de funcționare a procedurii propuse, s-a continuat procesul de selecție, prin selectarea celei mai convenabile zone ce va fi analizate.

În acest scop, s-a ales ca și criteriu de selecție dotarea tehnologică a stației electrice. Astfel, s-a ales ca și consumator de sistem, toată zona alimentată de către linia electrică de 110kV care realizează conexiunea dintre stația Săcălaz și stația Cărpiniș. Această alegere s-a făcut datorită faptului că linia este echipată cu protecție de tip DIPA, care dispune și de funcția de „înregistrator de perturbații”.

Din documentația tehnică a dispozitivelor de monitorizare, rezultă că acestea salvează fișiere cu extensia „CDR” (Compact Disturbance Recorder). Astfel s-au găsit în baza de date câteva fișiere, care conțineau curbele de tensiune și de curent înregistrate pe durata unor goluri de tensiune.

Totodată s-a stabilit realizarea monitorizării pe parcursul anului 2009, pentru a se obține noi înregistrări privind comportarea consumatorului de sistem pe durata golurilor de tensiune.

Un alt avantaj pentru care s-a ales această zonă de rețea este acela că furnizorul echipamentului de monitorizare, dispunea și de o funcție de conversie a fișierelor CDR în fișiere de format COMTRADE (Anexa V, Fig.A5.1). Acest lucru este foarte avantajos pentru că nu mai apare necesitatea realizării programului de conversie.

Atât fișierele mai vechi găsite, cât și cele ce se obțin în urma monitorizării sunt utilizate pentru realizarea bazei de date cu ajutorul programului „Evenimente”.

Fișierele citite sunt grupate, sub formă de evenimente, în funcție de locul unde s-a realizat achiziția de date și în funcție de data și ora la care a avut loc evenimentul.

După realizarea bazei de date, se selectează evenimentul ce se dorește a fi analizat, iar pe baza informațiilor se identifică fișierul în format COMTRADE, iar dacă este necesar acesta se poate salva în mai multe formate generale de fișiere, în funcție de opțiunea pe care dorim să o utilizăm la citirea datelor în programul *Prelucrare Date*.

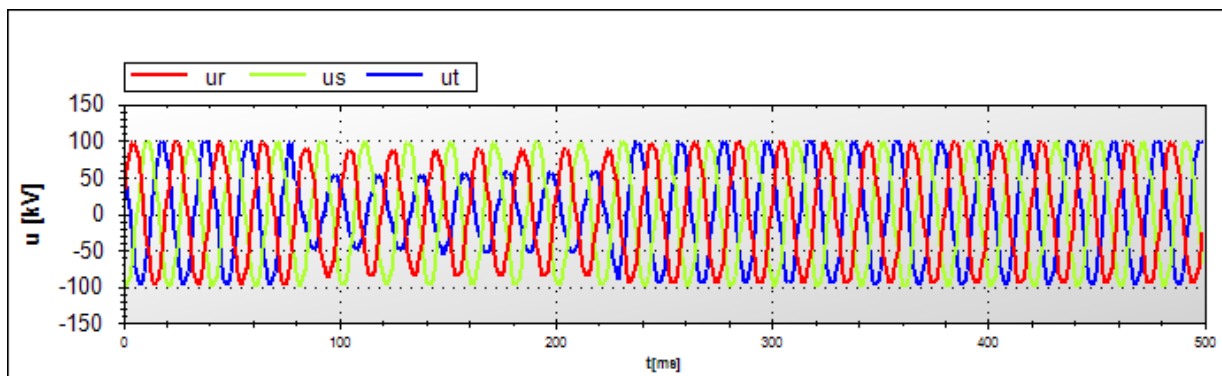
În continuare s-a selectat fișierul înregistrat în data de 07.08.2009, ora 01:15:45. În urma vizualizării informațiilor despre eveniment se poate observa că achiziția s-a realizat cu o frecvență de eșantionare de 1kHz.

6.5.2. Prelucrarea datelor

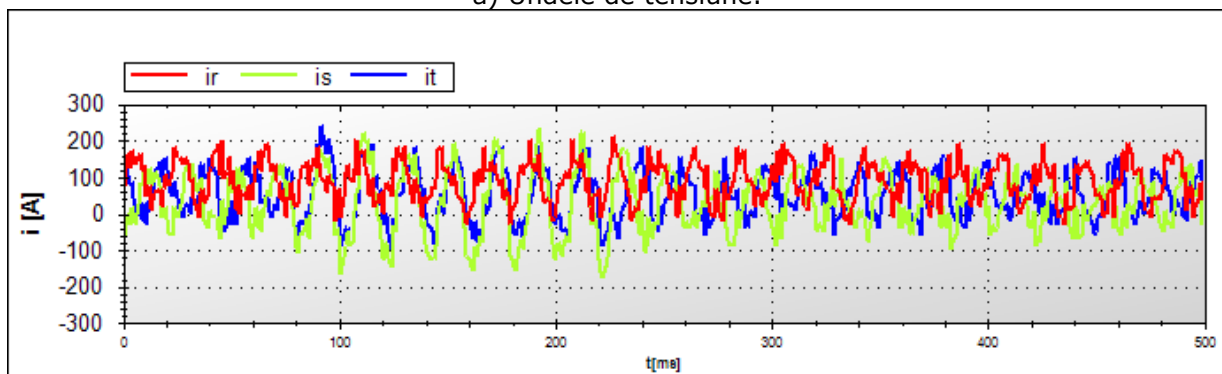
În scopul realizării acestei etape din procedura propusă în acest capitol, se utilizează programul „*Prelucrare date*”.

După cum s-a precizat în partea teoretică a acestui capitol, prima etapă din procedeu de prelucrare a datelor începe cu citirea acestora din fișiere cu formate generale cum ar fi DAT (COMTRADE), CSV (Comma-Separated Values), XLS, TXT. Astfel, acest program are posibilitatea de a utiliza oricare dintre cele patru tipuri de fișiere, iar în acest paragraf s-a pornit de la citirea fișierelor COMTRADE.

În urma citirii informației din fișier, aceasta se poate vizualiza grafic (Fig.6.6.a pentru curbele tensiunilor și Fig.6.6.b pentru curbele curenților), și de aici se poate verifica vizual dacă ordinea de citire a datelor a fost corectă din punct de vedere a mărimilor electrice reprezentate grafic.



a) Undele de tensiune.



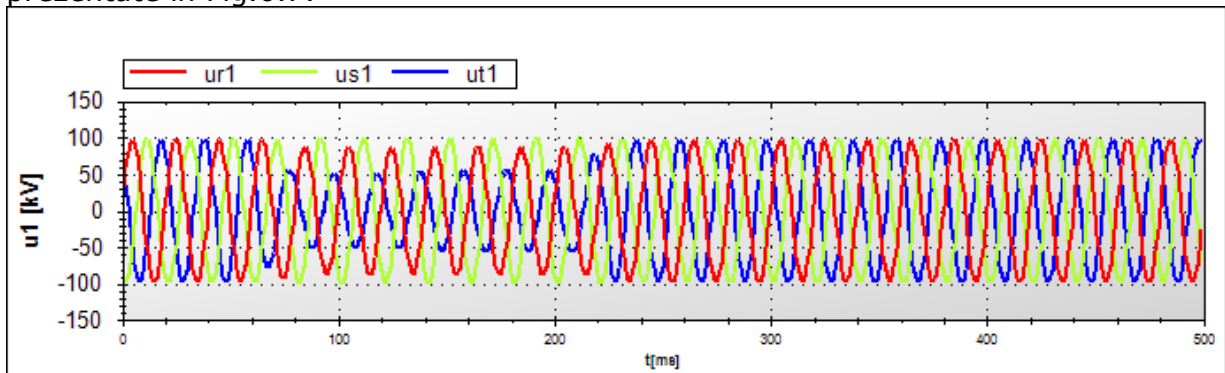
b) Undele de curent.

Fig.6.6. Forma undelor de tensiune (a) și de curent (b) pe durata golului de tensiune analizat.

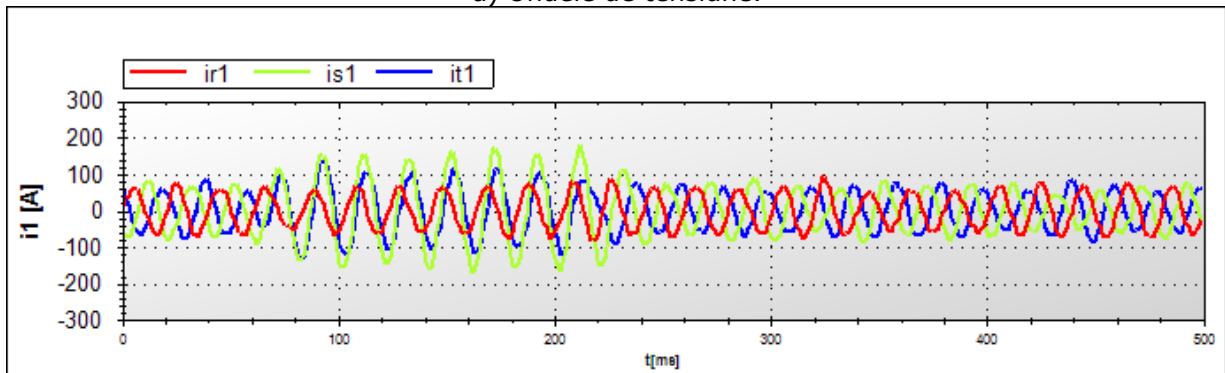
Ca și o primă concluzie care se poate trage din aceste grafice este aceea că, la bornele consumatorului de sistem avem un regim nesinusoidal, în plus se poate observa și o mică nesimetrie a curenților pe faze.

După cum s-a prezentat în paragrafele anterioare, analiza se realizează la frecvența fundamentală a semnalelor, astfel că din program se precizează determinarea curbelor de tensiune și de curent doar pentru frecvența fundamentală. Înainte de aplicarea algoritmului, se mai setează numărul de măsurători realizate pe durata unei perioade din frecvența fundamentală. Acest număr se determină cu ajutorul frecvenței de eșantionare. Astfel pentru cazul analizat avem o frecvență de eșantionare de 1kHz și frecvența fundamentală a semnalului de 50Hz, de unde rezultă că pentru aplicarea algoritmului pe o perioadă din fundamentală, numărul de eșantioane care trebuie luat în considerare este 20.

Curbele tensiunilor și curenților obținute pentru frecvența fundamentală sunt prezentate în Fig.6.7.



a) Undele de tensiune.



b) Undele de curent.

Fig.6.7. Forma undelor de tensiune (a) și de curent (b) pe frecvența fundamentală pe durata golului de tensiune analizat.

Următoarea etapă care trebuie parcursă de către program, este aceea de realizare a segmentării. Pentru a se efectua acest pas, se setează indicele de reducere a eșantioanelor la valoarea 4, iar apoi se setează pragul peste care se consideră segment de tranziție, la valoarea 0.02 dacă analiza se realizează în u.r.

În Fig.6.8 se prezintă procesul de segmentare aplicat evenimentului considerat. Pe această figură se observă existența a cinci segmente, ceea ce conduce la concluzia că există un gol de tensiune. Primul segment de tranziție apare la momentul $t=60\text{ms}$ și se termină la $t=83\text{ms}$. Al doilea segment de tranziție apare la momentul $t=209\text{ms}$ și se termină la $t=232\text{ms}$. Prin urmare se poate spune că segmentul pe care se face analiza golului de tensiune este dat de intervalul (83-209)ms.

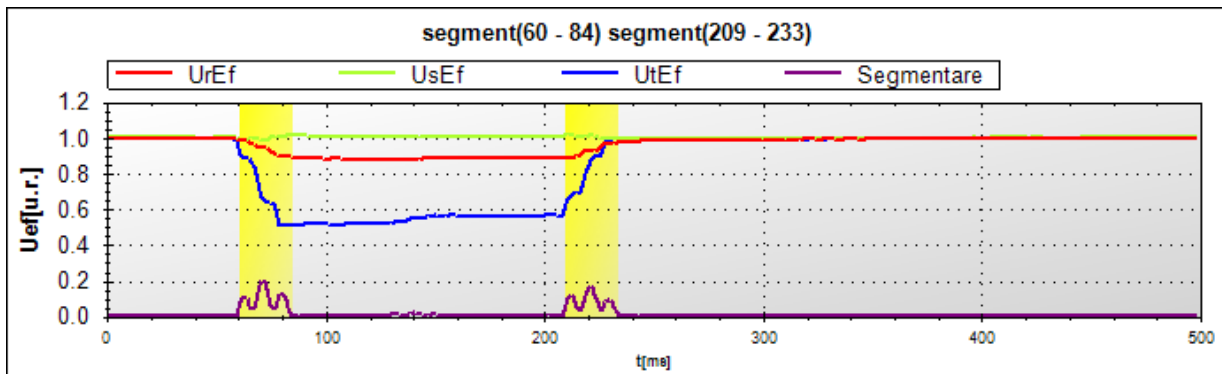


Fig.6.8. Segmentarea golului de tensiune.

După realizarea segmentării, se aplică procedura de identificare a tipului golului de tensiune utilizând metoda propusă în capitolul 4. Din rularea programului se observă că golul de tensiune este de tipul D, are o amplitudine dată de tensiunea remanentă exprimată prin coeficientul $h=0.5089\approx 0.51$ și o durată de 149ms. Toate acestea se pot vedea în Fig.6.9. În plus, tipul golului de tensiune se pot observa și pe graficul din Fig.6.10 ridicat în timpul primei etape de identificare a tipului golului de tensiune.

Prelucrare date - Tip gol							
Tip gol Iesire							
	Nr	Intrare	Iesire	Tip gol	Tensiune	Faza afectata	Durata
▶	0	84	209	D	0.508912355999...	T	149
*							

Fig.6.9. Captură din program care prezintă rezultatele obținute prin aplicarea algoritmului propus pentru identificarea caracteristicilor golului de tensiune.

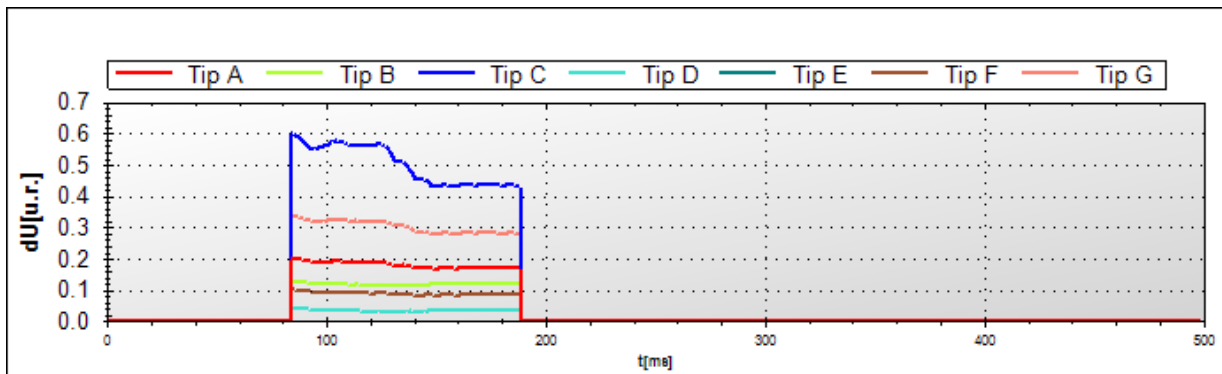


Fig.6.10. Identificarea tipului golului de tensiune - Etapa 1.

În finalul programului *Prelucrare Date* se pot obține grafic următoarele mărimi:

- tensiunile efective (Fig.6.11);
- curenții efectivi (Fig.6.12);
- puterea activă și reactivă (Fig.6.13).

Din graficul tensiunilor efective se poate observa și mai bine caracteristicile golului de tensiune și anume tipul D dat de o cădere de tensiune mai accentuată pe o fază și căderi de tensiune mai reduse pe celelalte două faze, precum și amplitudinea și durata golului de tensiune. Totodată se poate observa că faza afectată este faza T.

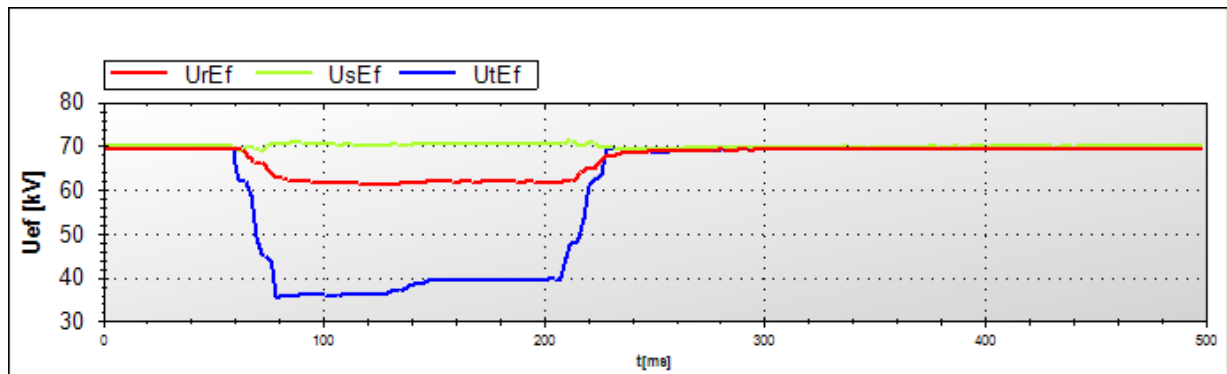


Fig.6.11. Reprezentarea tensiunilor efective.

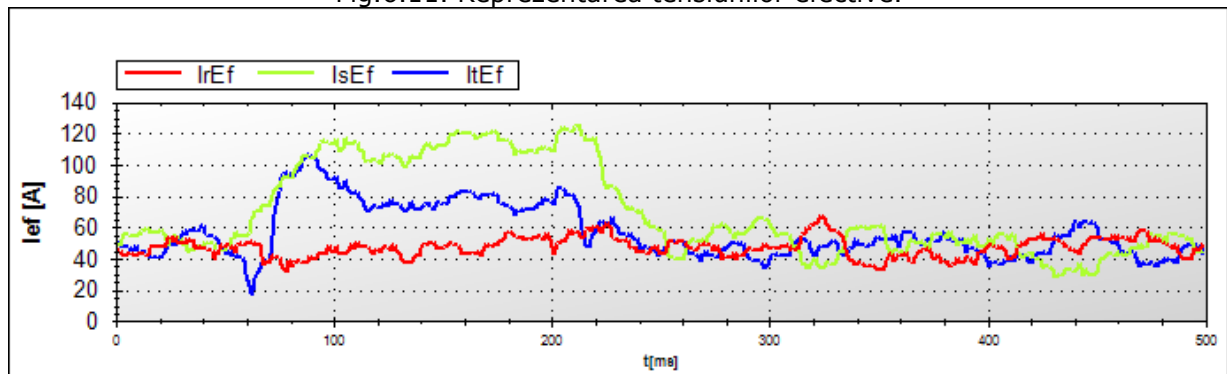


Fig.6.12. Reprezentarea curenților efectivi.

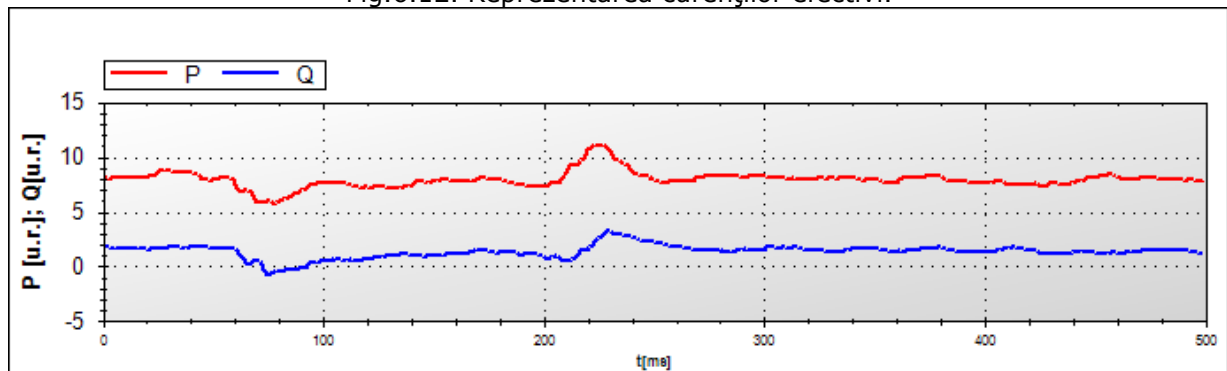


Fig.6.13. Reprezentarea puterilor activă și reactivă.

Graficele indică o structură a consumatorului complex constituit dintr-o componentă rotativă (motoare electrice), care conduce la o creștere a curentului pe faza afectată (Fig.6.12) și o componentă de consum static dependentă de pătratul tensiunii. Variația puterii reactive (Fig.6.13) indică un grad ridicat de compensare capacitivă, ceea ce conduce, pe durata golului, la o injecție de putere inductivă în nodul monitorizat. Graficele de mai sus permit în continuare estimarea parametrilor consumatorului echivalent, procedură descrisă în capitolul 5.

6.5.3. Identificarea consumatorului de sistem

Pentru a face analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem ales în paragraful 6.5.1, trebuie cunoscuți parametrii caracteristici ai acestuia.

În capitolul 5 s-a prezentat algoritmul programului *Identificare* pentru identificarea consumatorului de sistem pornind de la înregistrarea curbelor de tensiune și de curent, pe durata unor perturbații de tip gol de tensiune.

Algoritmul de identificare conține trei etape: în prima etapă se determină caracteristicile golului de tensiune; în a doua etapă se generează curbele curenților și a puterilor obținute prin simulare software; în a treia etapă se estimează parametrii consumatorului echivalent prin compararea matematică a curbelor generate software cu cele înregistrate.

Parametrii caracteristici ai golului de tensiune au fost identificați în paragraful 6.5.2 și prezentați în Fig.6.9, iar setarea acestora în programul *Identificare* se observă în Fig.6.14.

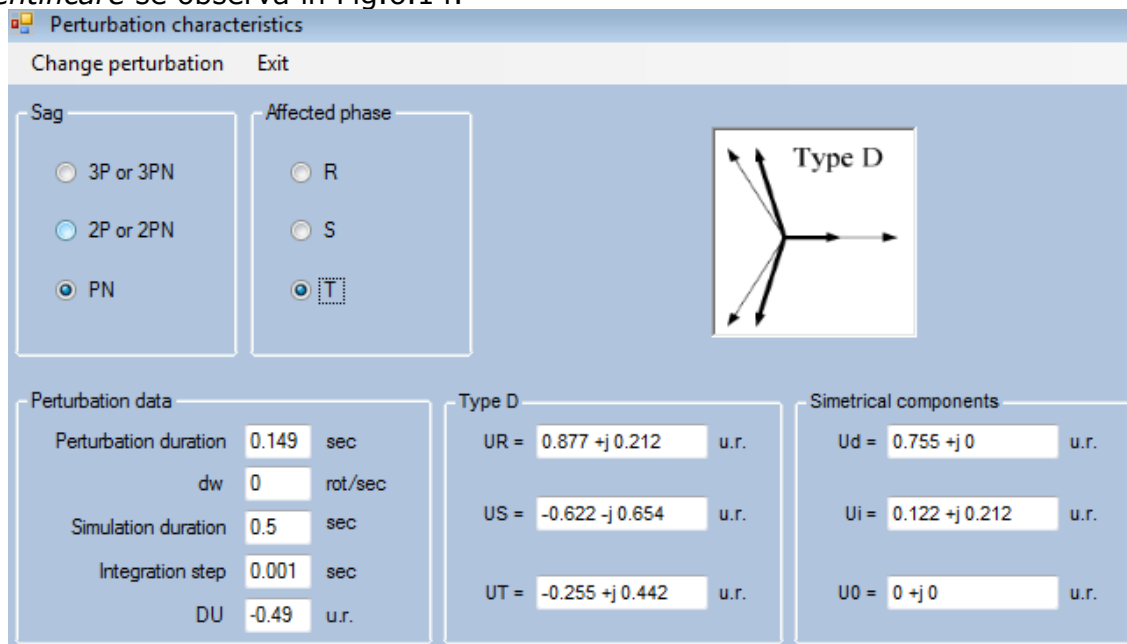


Fig.6.14. Captură din program privind setarea caracteristicilor golurilor de tensiune.

Pentru estimarea parametrilor consumatorului de sistem se folosesc valorile efective ale curenților și puterile medii determinate cu ajutorul programului *Prelucrare Date*.

După ce au fost încărcate măsurătorile reale, respectiv au fost trasate graficele obținute atât din măsurătorile reale cât și din cele simulate, se face o ajustare manuală (Fig.6.15) a parametrilor consumatorului de sistem, ajustare care are rol de a realiza o inițializare cât mai apropiată a parametrilor echivalenței, pentru a asigura convergența procesului de estimare.

În Fig.6.15 se observă valorile inițiale care au fost setate pentru procesul de estimare a parametrilor consumatorului de sistem, precum și variația curbelor puterilor active și reactive, măsurate (culoare roșie și linie grosă) respectiv calculate (culoare albastră și linie subțire).

Estimarea parametrilor consumatorului de sistem se realizează prin aplicarea metodei celor mai mici pătrate, pentru curbele puterilor sau pentru curbele curenților (Fig.6.16).

În urma procesului de estimare (în cazul de față pe curbele puterilor), rezultatele se pot observa în Fig.6.17 (a. și b.). Suplimentar se prezintă în Fig.6.17 (c, d, e) variația curbelor curenților. Din ambele cazuri se poate observa existența a unor diferențe relativ mici între curbele estimate și cele măsurate. Pe graficul puterii

active se poate observa o suprapunere foarte bună a celor două curbe (măsurate și generate prin simulare). În schimb la curbele puterii reactive diferențele sunt puțin mai mari. Pentru a înțelege evoluția graficelor trebuie precizat că una dintre condițiile impuse procesului de estimare a fost aceea de a se realiza o suprapunere cât mai exactă a graficelor pe durata regimului ante-perturbație.

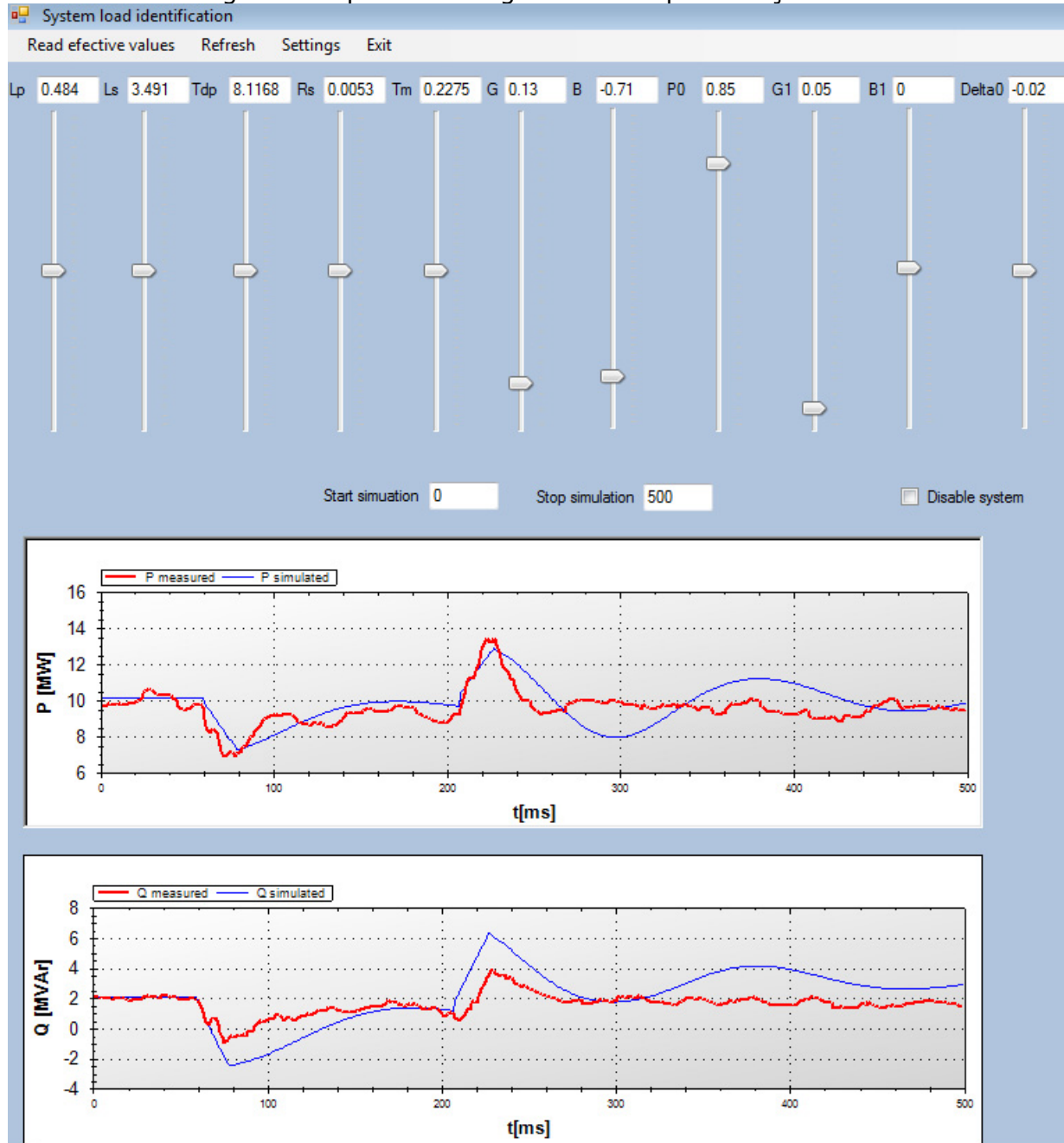


Fig.6.15. Captură privind reglarea manuală a parametrilor consumatorului de sistem.

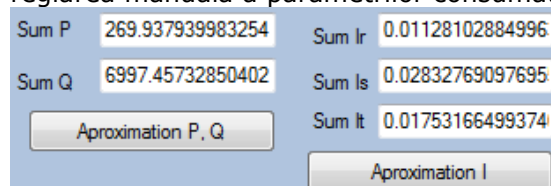


Fig.6.16. Captură privind pornirea estimării automate a parametrilor consumatorului de sistem.

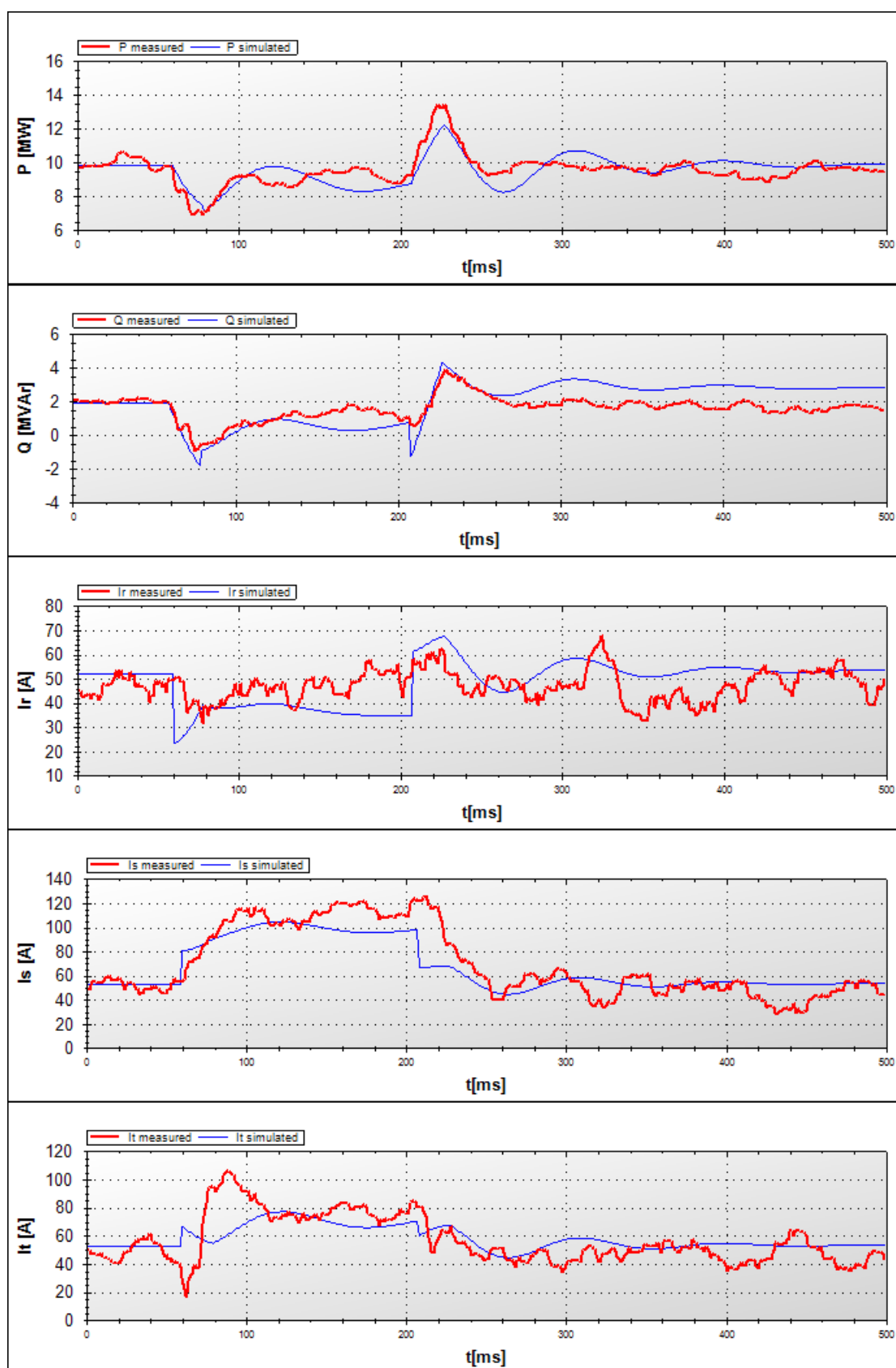


Fig.6.17. Variația puterilor active (a) și reactive (b) și variația curenților pe faze (c, d, e) în urma procesului de estimare a parametrilor consumatorului de sistem.

Diferențele care apar între graficele generate software și cele obținute din măsurători reale apar din următoarele motive. Cel mai important motiv este acela că estimarea parametrilor nu s-a realizat cu valorile reale ale tensiunilor, ci cu valori teoretice. În general estimarea experimentală a parametrilor presupune utilizarea sistemului real de tensiuni înregistrate, pentru generarea curbelor curenților sau a puterilor. Pentru aceasta trebuia realizat un model mai complex, lucru care nu reprezintă scopul acestei lucrări.

Variația în timp, respectiv dezechilibrul parametrilor consumatorului de sistem reprezintă un al doilea motiv pentru explicarea diferențelor apărute între graficele generate și cele obținute din măsurători. Acest lucru se poate observa cel mai bine din variația, în regimul ante-perturbație, a curenților măsurați.

Dintre cauze care pot genera diferențe între valorile măsurate și cele obținute în urma simulării, mai menționăm aproximările făcute în procesul de modelare a consumatorului complex, erorile introduse de procesul de măsurare (în special datorită ratei de eșantionare mică), regimurile deformante, etc.

În final dacă ne referim strict la diferențele obținute în cadrul curenților pe faze putem spune că acestea se datorează mai ales caracterului nesimetric și nesinusoidal a curenților înregistrați la bornele consumatorului de sistem.

În continuare se prezintă parametrii echivalenți ai consumatorului de sistem, rezultați în urma procesului de estimare, astfel: în Fig.6.18 pentru componenta statică și în Fig.6.19 pentru componenta dinamică.

<p>Yst</p> <p>Yst = 0.05 -j -0.5 u.r.</p> <p>Ssn = 10000 kVA</p>	<p>Ante-perturbation regime</p> <p>U0 = 1.0 u.r.n</p> <p>P0 = 0.85 u.r.n</p> <p>w0 = 1.0 u.r.n</p> <p>Delta0 = -0.04 u.r.n</p>
<p>Yst1</p> <p>Yst1 = 0.1 -j 0 u.r.</p> <p>Ssn1 = 10000 kVA</p>	

Fig.6.18. Parametrii echivalenți ai componentei statice, rezultați în urma procesului de estimare.

3M	Ls = 3.254 u.r.n	Tdp = 7.7236 sec	Beta = 2	Sn = 10000 kVA	R = 0.0116 u.r.n
	Lp = 0.3836 u.r.n	Tm = 0.1118 sec	Un = 110 kV	wn = 314 rad/sec	

Fig.6.19. Parametrii echivalenți ai componentei dinamice, rezultați în urma procesului de estimare.

Pentru validarea rezultatelor obținute în urma procesului de identificare, se va considera un nou caz, înregistrat în data de 10.08.2009, ora 03:54:49.

În acest sens s-au încărcat fișierul corespunzător în programul *Prelucrare date*, iar rezultatele obținute au fost salvate și ulterior încărcate în programul *Identificare*.

Graficele obținute cu ajutorul softului au fost generate cu parametrii identificați anterior. Pentru suprapunerea graficelor obținute s-au modificat doar puterile totale, acestea fiind scăzute cu 15%. Rezultatele privind puterile activă și reactivă, precum și variația curenților pe faze, obținute în urma simulării precum și cele înregistrate la bornele consumatorului sunt prezentate în Fig.6.20. În urma analizei comparative, se constată că graficele obținute cu ajutorul programului, utilizând parametrii identificați, au aceeași formă cu cele obținute din înregistrări.

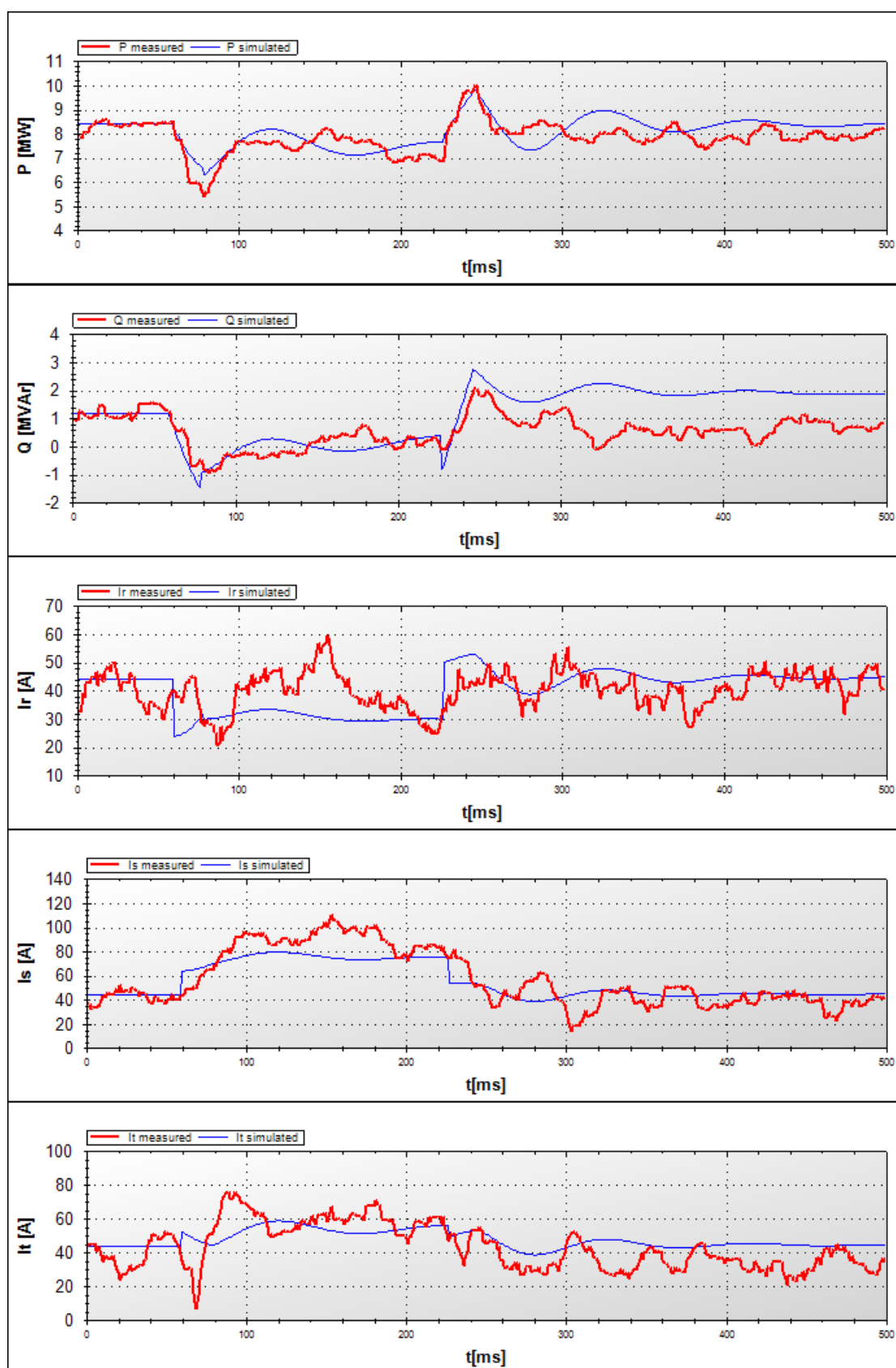


Fig.6.20. Variația puterilor active (a) și reactive (b) și variația curentilor pe faze (c, d, e) în pentru consumatorul identificat anterior supus la o altă perturbație.

Dintre toți parametrii consumatorului de sistem singurul care a fost modificat a fost cel de putere reactivă, deoarece compensarea puterii reactive se face cu baterii de condensatoare care sunt reglate în trepte.

Pentru verificarea corectitudinii parametrilor s-a aplicat și pentru acest caz procedura de estimare a parametrilor, rezultatele variind cu mai puțin de 10% pentru fiecare parametru în parte. Aceiași concluzie se poate trage și din analiza întregii baze de date înregistrată în aceeași perioadă de timp (adică regim de vară, ore de noapte).

6.5.4. Analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem identificat

Pentru a se realiza acest obiectiv, se aplică algoritmul din Fig.5.10 pentru obținerea valorilor necesare realizării unor reprezentări tridimensionale, astfel: pe o axă se va trece variația duratei golului de tensiune (Dt), pe a doua axă apare variația amplitudinii golului de tensiune (DU), iar pe a treia axă se reprezintă raportul dintre valoarea maximă și valoarea nominală a curentului care se obține pe cele trei faze (I_{max}).

În Fig.6.21 se prezintă variația curentului maxim pentru tipul A de gol de tensiune. Din analiza graficului se poate observa că valorile maxime ale curenților pe faze variază destul de mult în funcție de durata golului și de amplitudinea acestuia. Astfel putem spune că valori mai ridicate ale curenților maximi se obțin pentru amplitudini foarte scăzute, la durate mici ale golului de tensiune (aproape de 0), în timp ce pentru amplitudini mai mari, se obțin valorile mai mari ale curentului maxim pentru durate mai crescute ale golului de tensiune.

În această situație curentul maxim este de 5.16 ori mai mare decât curentul din regim normal, iar acesta se obține la o durată de 0.06s și o amplitudine de 0.15u.r ($\Delta U = -0,85u.r.$).

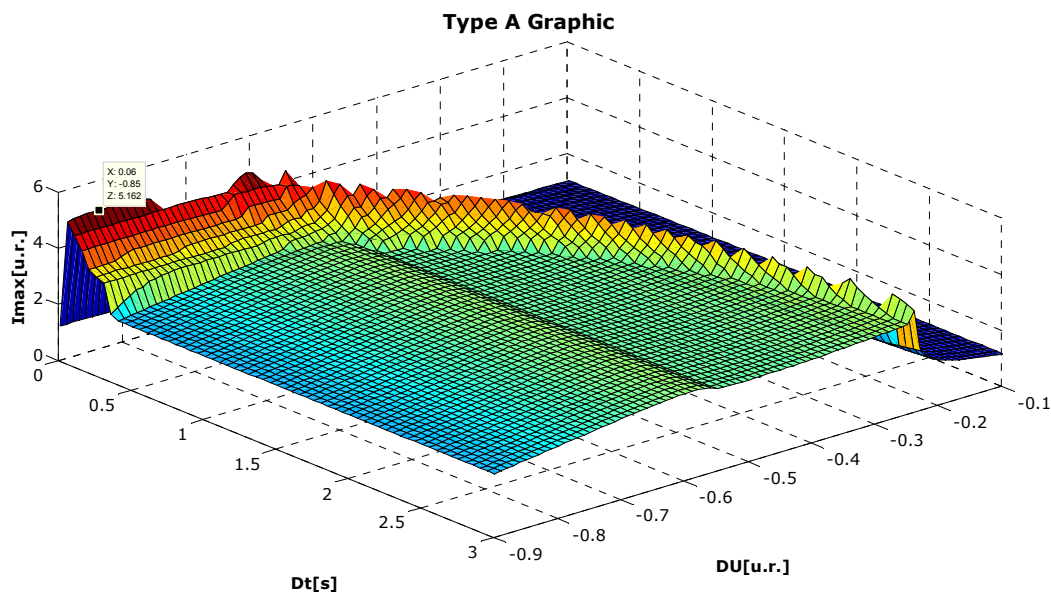


Fig.6.21. Variația curentului maxim pentru tipul A de gol de tensiune

În Fig.6.22 se prezintă variația curentului maxim pentru tipul B de gol de tensiune. Pentru acesta se poate observa că valorile curenților maximi sunt mai mici

ca și în cazul precedent, în plus se poate spune că valori periculoase a curenților apar pentru amplitudini mici și durate foarte mari (între 1 și 3 secunde).

Spre deosebire de cazul anterior se poate observa că pentru tipul B pentru toate duratele mai mari și amplitudinile mai mici decât cele pentru care se ating maximele, curenții ajung la valori ridicate.

Pentru Tipul B curentul maxim este de 3.92 ori mai mare decât curentul din regim normal, iar acesta se obține la o durată de 1.51s și o amplitudine de 0.13u.r. ($\Delta U = -0,87u.r.$).

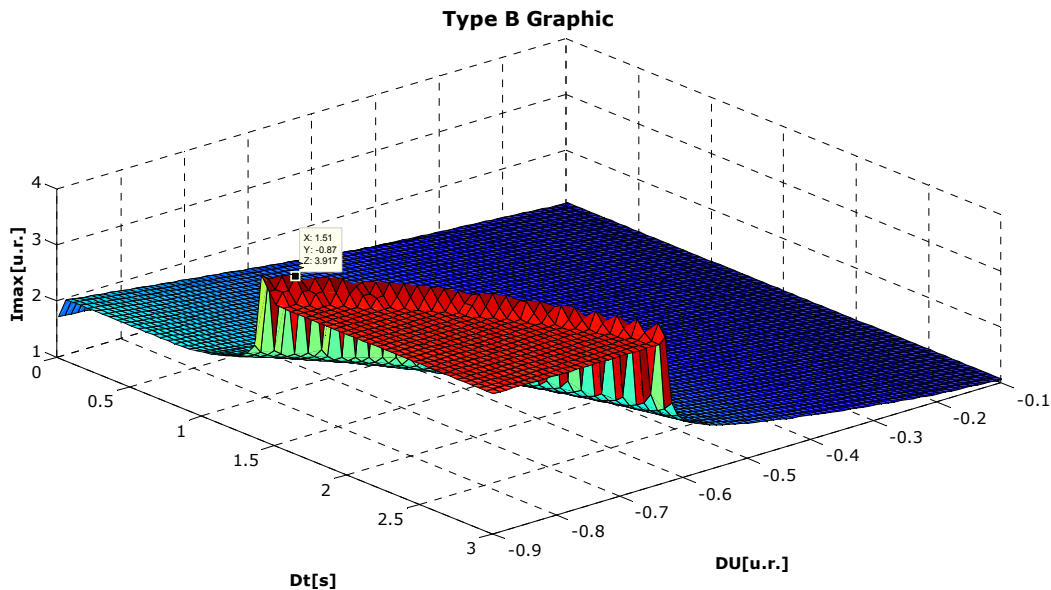


Fig.6.22. Variația curentului maxim pentru tipul B de gol de tensiune.

În Fig. 6.23 se prezintă rezultatele obținute pentru tipul C. Pentru acest tip se poate observa o variație asemănătoare cu cea de la tipul B dar cu specificația că în această situație valorile maxime se obțin și pentru amplitudini mai mari și durate mai scurte.

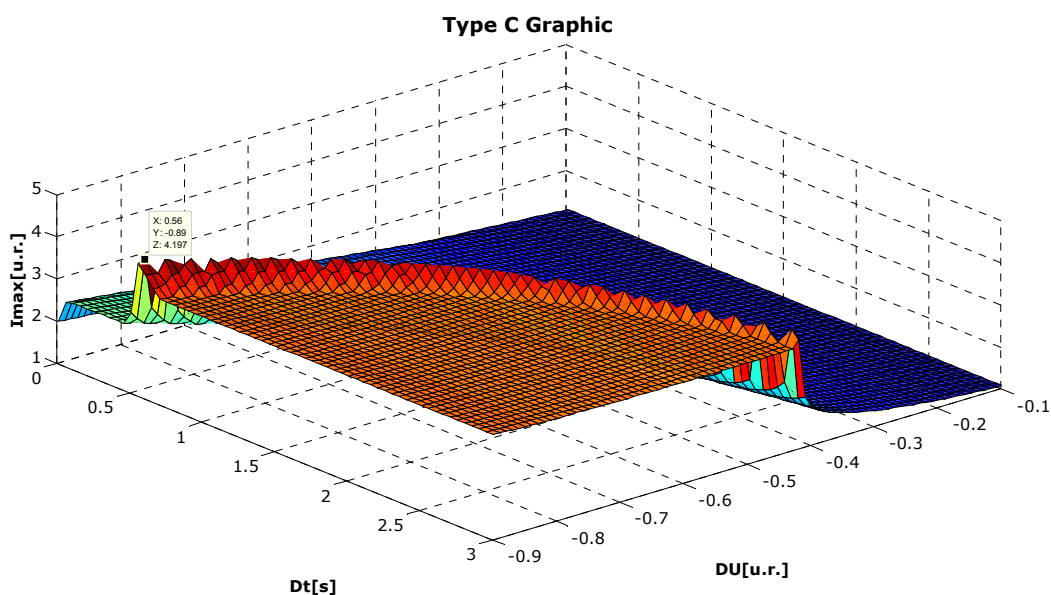


Fig.6.23. Variația curentului maxim pentru tipul C de gol de tensiune.

Pentru tipul C de gol de tensiune curentul maxim este de 4.2 ori mai mare decât curentul din regim normal, iar acesta se obține la o durată de 0.56s și o amplitudine de 0.11u.r ($\Delta U = -0,89u.r.$).

Variația curentului maxim pentru tipul D este prezentată în Fig.6.24. Aceasta este foarte asemănătoare cu cea de la tipul C, obținându-se același vârf de curent pentru aceeași amplitudine și aceeași durată. Diferența dintre ele se regăsește în principal în valorile mai mari pentru tipul D, pentru majoritatea combinațiilor de durată și amplitudine a golului de tensiune.

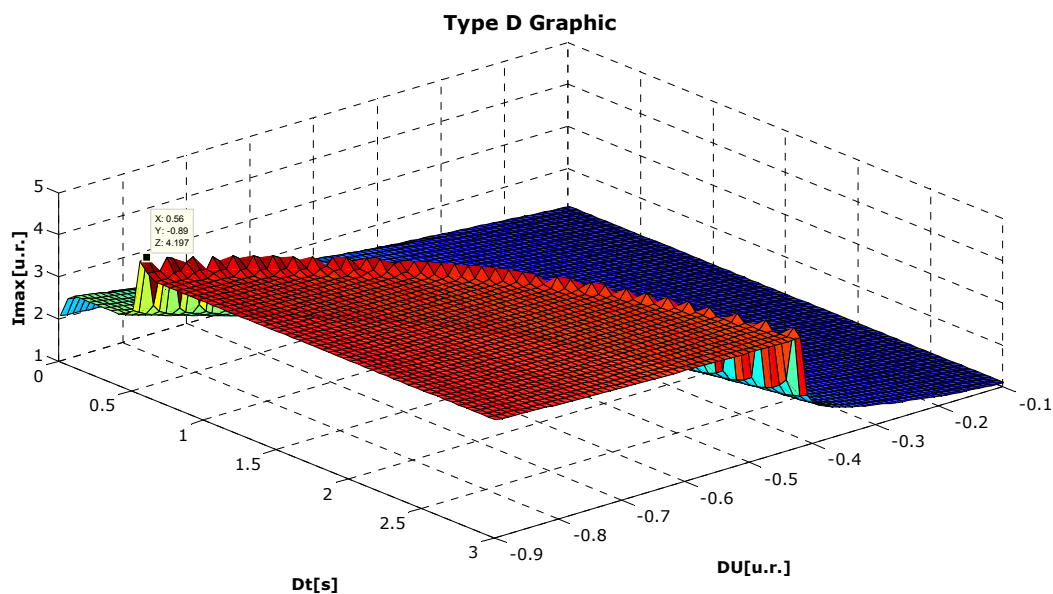


Fig.6.24. Variația curentului maxim pentru tipul D de gol de tensiune.

Variația curentilor pentru tipul E este prezentată în Fig.6.25. Pentru această situație, vârfurile mai periculoase de curent se obțin de asemenea la amplitudini mici și durate foarte mici, asemănător cu cele de la tipul A.

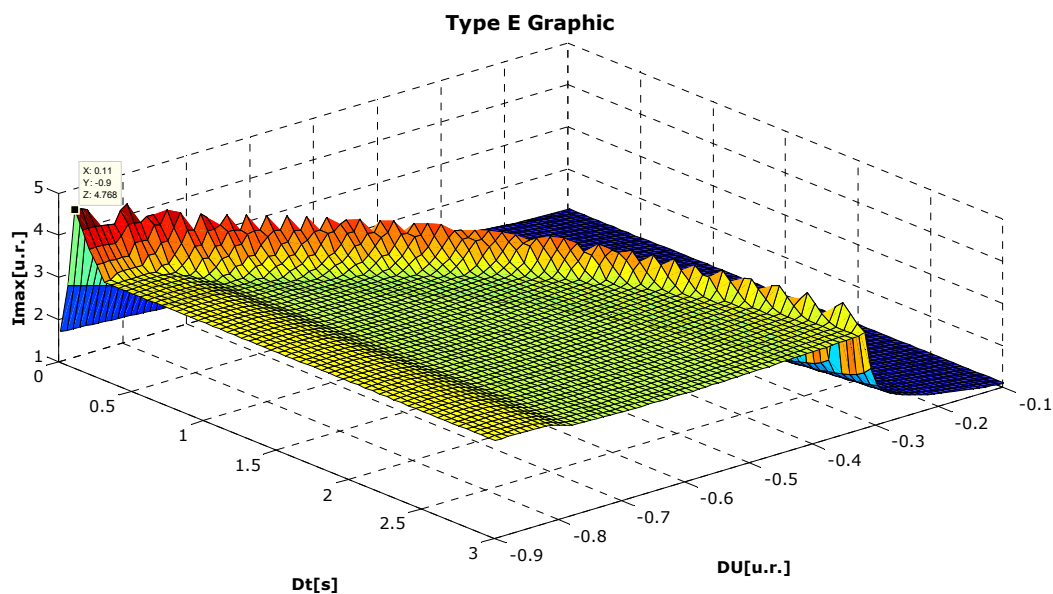


Fig.6.25. Variația curentului maxim pentru tipul E de gol de tensiune.

Totodată se observă că la durate mai mari, valoarea maximă a curentului ia valori puțin mai scăzute față de vârfurile de curent obținute pentru combinații particulare de durată și amplitudine a golului de tensiune.

Pentru tipul E de gol de tensiune curentul maxim este de 4.77 ori mai mare decât curentul din regim normal, iar acesta se obține la o durată de 0.11s și o amplitudine de 0.10u.r ($\Delta U = -0,90u.r.$).

În Fig.6.26 se prezintă variația curentilor maximi pentru tipul F de gol de tensiune, iar în Fig.6.27 pentru tipul G de gol de tensiune. Aceștia au variație foarte asemănătoare cu cea de la tipul E, obținându-se chiar același vârf maxim, obținut la același moment de timp și la aceeași amplitudine. Diferența dintre aceste tipuri de goluri de tensiune este dată de valorile maxime ale curentilor obținute pentru majoritatea perechilor durată-amplitudine. Ordinea de mărime dinspre mai mic spre mai mare este E, G, F.

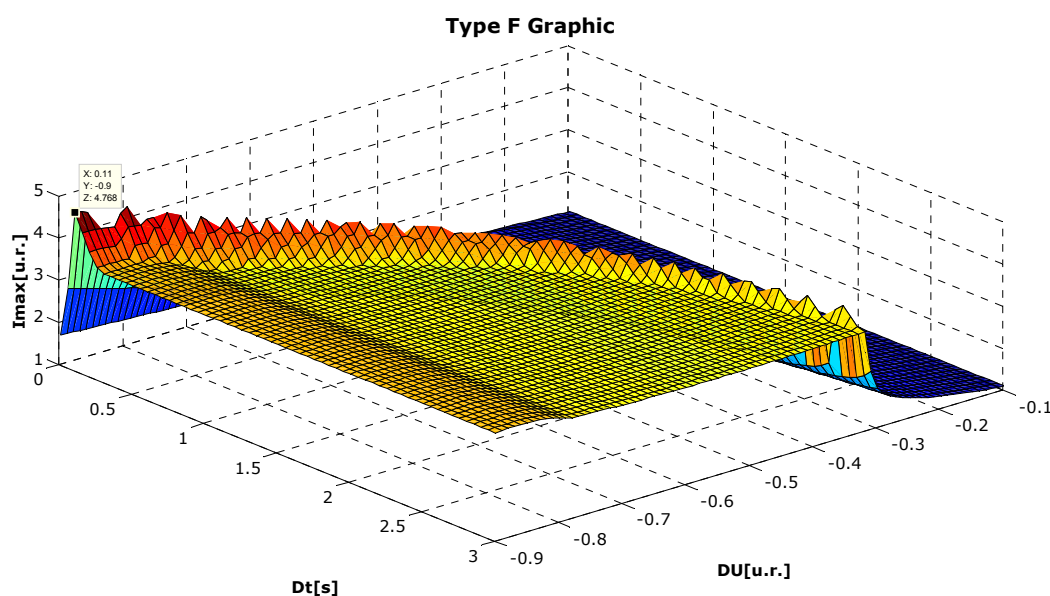


Fig.6.26. Variația curentului maxim pentru tipul F de gol de tensiune.

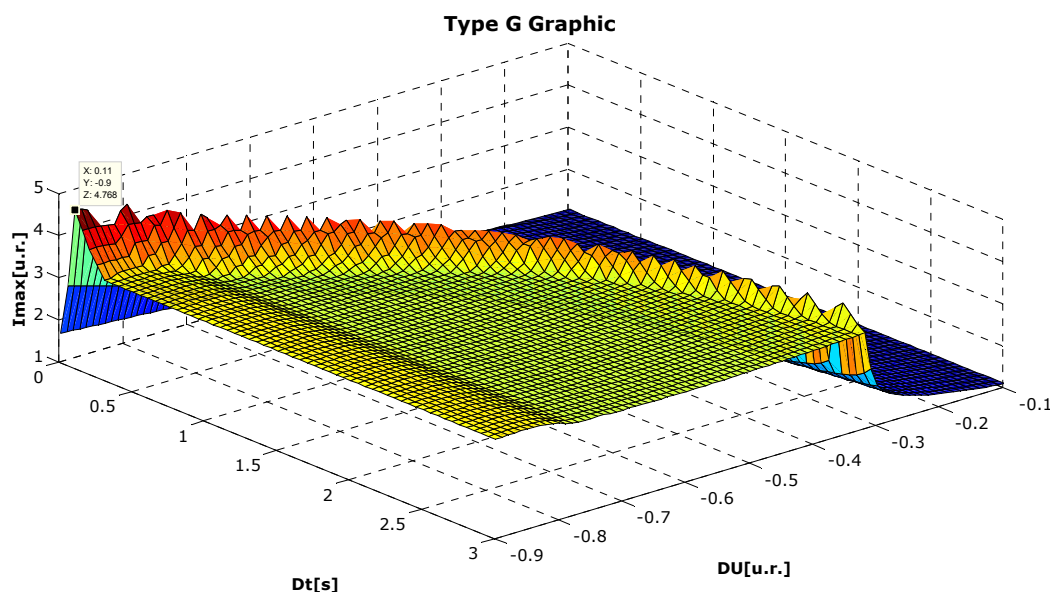


Fig.6.27. Variația curentului maxim pentru tipul G de gol de tensiune.

Astfel, pentru cazul analizat se poate spune că valorile cele mai periculoase a curenților se obțin pentru tipul A. Totuși cea mai importantă concluzie este aceea că pentru toate tipurile de goluri de tensiune se obțin curenți mari în cazul în care durata golului de tensiune este mai ridicată.

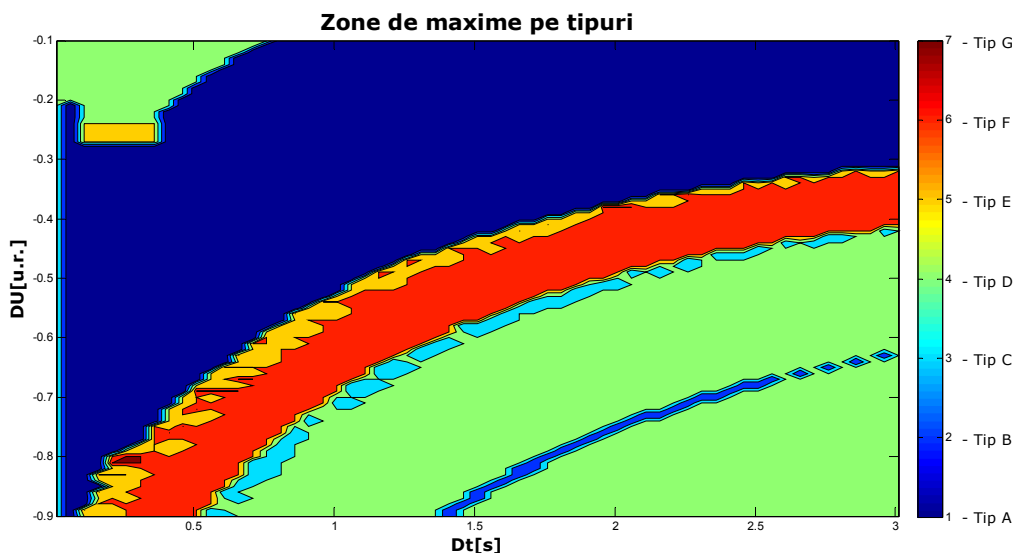


Fig.6.28. Zone de maxime pe tipuri.

În final, se prezintă o hartă din care reiese care tip de gol de tensiune este mai periculos pentru o anumită pereche durată-amplitudine (Fig.6.28). Pe graficul din Fig.6.28 se observă că pentru majoritatea perechilor durată-amplitudine se obțin creșteri maxime de curenți pentru tipurile A și D.

6.6. Concluzii și contribuții

În acest capitol se propune un algoritm de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem. Algoritmii are la bază utilizarea unui pachet de programe cu funcții diferite, astfel încât să se poată realiza toate etapele propuse de acest algoritm.

Complexitatea algoritmului este destul de ridicată, în special datorită numărului de programe utilizat, iar acest lucru se poate observa și din studiul de caz realizat.

Astfel, într-o primă etapă s-a realizat o bază de date cu măsurători înregistrate la bornele consumatorului de sistem considerat. Înregistrările corespunzătoare consumatorului de sistem considerat a fost împărțite în patru grupe după două criterii: sezon (iarnă, vară), respectiv încărcare pe durata unei zile (ziua, noaptea).

Dintre aceste grupe, în această lucrare a fost prezentat cazul corespunzător regimului de vară pe durata nopții, alegere făcută datorită numărului mai mare de înregistrări existente.

Din grupul de măsurători ales, s-a selectat o înregistrare care a fost folosită la identificarea parametrilor consumatorului de sistem, iar ulterior o altă înregistrare a fost folosită pentru confirmarea rezultatelor obținute. Suplimentar s-a realizat o identificare a parametrilor consumatorului de sistem cu toate înregistrările

corespunzătoare grupului ales, ajungându-se la concluzia că valorile parametrilor obținuți diferă cu maxim 10% față de parametrii identificați în primul caz.

O concluzie importantă referitoare la identificarea consumatorului este că aceasta trebuie realizată pentru fiecare situație pe care dorim să o analizăm. Astfel, în această lucrare s-a precizat că împărțirea s-a realizat în patru grupe, dar în funcție de cerințele impuse analizei se pot lua în considerare și alte criterii, cum ar fi identificarea consumatorului pentru diferite intervale orare a unei zile.

Pentru consumatorul cunoscut în urma identificării s-a determinat valoarea maximă a curentului pe faze, care se obține pentru fiecare pereche durată-amplitudine a golului de tensiune. Analiza s-a realizat pentru fiecare tip de gol de tensiune la amplitudini între 0.1u.r. și 0.9u.r. (sau căderi de tensiune între -0.9u.r. și -0.1u.r.), respectiv pentru durate între 0.01s și 3s. Aceste valori au fost alese astfel încât să includă complet prevederile standardului EN50160, privind durata și amplitudinea pentru care o cădere de tensiune se consideră gol de tensiune. Datele obținute în urma simulării au fost prezentate în cadrul unor grafice tridimensionale.

În urma analizei celor șapte grafice rezultate s-a ajuns la concluzia că pentru fiecare caz al perechii durată-amplitudine a golului de tensiune ce afectează consumatorul de sistem, valoarea maximă a curentului se obține pentru diferite tipuri de goluri de tensiune. Totuși cea mai mare valoare a curentului se obține pentru un gol de tensiune de tip A.

Se mai poate preciza că o clasificare a ordinii în care un tip de gol de tensiune este mai periculos decât altul pentru consumatorul de sistem, se poate realiza doar pe intervale de perechi durată-amplitudine a golului de tensiune.

Pornind de la ideea că orice consumator de sistem se poate echivala la capătul unei linii electrice de distribuție radială, se poate spune că o variație prea mare a curenților pe faze poate conduce la o funcționare defectuoasă a protecției liniei electrice. În acest sens se poate spune că la reglarea protecției liniei electrice, trebuie ținut cont de faptul că valoarea curentului pe faze poate să ajungă până la de cinci ori mai mare decât valoarea curentului din regim normal de funcționare.

Din punct de vedere al contribuțiilor personale se poate spune că întreg capitolul are un caracter original. În continuare se prezintă principalele contribuții:

- realizarea unui *algoritm original* privind metoda de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem;
- realizarea unei baze de date cu înregistrări efectuate la bornele unor consumatori de sistem, care are marele avantaj că pune la dispoziție informația în formate internaționale standardizate cum ar fi: *.XLS, COMTRADE, *.TXT;
- realizarea unui program care să permită o prelucrare a semnalelor înregistrate la bornele unui consumator de sistem, astfel încât să se obțină atât mărimile electrice de interes cât și caracteristicile golului de tensiune care a afectat consumatorul;
- realizarea unui program pentru identificarea consumatorilor de sistem pornind de la utilizarea fișierelor înregistrate pe durata golurilor de tensiuni, precum și identificarea unui consumator de sistem;
- analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem identificat, precum și prezentarea celor mai rele efecte ce le poate avea acestea din punct de vedere al valorii curenților ce se pot stabili la bornele acestuia.

7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII

Cercetarea bibliografică, cercetările proprii și rezultatele obținute de autor, referitor la efectele golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem, permit formularea următoarelor concluzii:

1. Efectele negative ale golurilor de tensiune asupra consumatorilor, conduc la un interes crescut din partea specialiștilor în direcția identificării și diminuării acestui fenomen. În urma studiului bibliografic realizat în această direcție s-a stabilit că:

- golurile de tensiune reprezintă una dintre cele mai importante aspecte privind calitatea energiei electrice;
- ele sunt în general, generate de apariția curenților de scurtcircuit din sistem;
- monitorizarea lor a devenit o problemă din ce în ce mai discutată în cercurile ingineresti din întreaga lume;
- clasificare și caracterizarea lor reprezintă o problemă delicată, îndelung analizată, pentru care nu există o metodă general acceptată;
- influența golurilor de tensiune asupra consumatorilor dinamici este o problemă analizată în general pe cazuri particulare (efectul asupra unui motor sincron sau asincron), și mai puțin pe cazuri generale cum ar fi efectul golurilor de tensiune asupra unei zone care are un consum preponderent compus din consumatori rotativi.

2. Studiul golurilor de tensiune presupune monitorizarea calității tensiunii furnizate consumatorului, monitorizare care trebuie realizată concomitent în toate nodurile sistemului sau zonei din sistemul electroenergetic. Foarte important pentru cazul particular al golurilor de tensiune este faptul că monitorizarea trebuie realizată pe perioade cât mai lungi posibile, pentru a se putea ajunge la concluzii concludente și corecte.

3. Problema standardizării în domeniul golurilor de tensiune este una foarte delicată. Diversele standarde internaționale oferă valori diferite limitelor admisibile pentru mărimile caracteristice golurilor de tensiune. Probabil cea mai bună caracterizare este dată de standardul IEC 61000-4-30 care precizează că în funcție de problema analizată se pot stabili diferite limite mărimilor care caracterizează golurile de tensiune.

4. Clasificarea și caracterizarea golurilor de tensiune este de asemenea o problemă frecvent dezbătută în literatura de specialitate, neexistând o variantă univoc acceptată sau standardizată. Totuși se remarcă două tipuri de clasificări și anume „Clasificarea după componentele simetrice” și „Clasificarea ABC”. În această lucrare s-a ales utilizarea ultimului tip de clasificare, din considerente precizate în lucrare.

5. O altă problemă delicată este aceea de a determina caracteristicile golurilor de tensiune, conform clasificării ABC, pentru curbe de tensiune obținute din înregistrări cu aparate de monitorizare. Analiza principalelor metode existente în literatură a condus la dezvoltarea unei noi metode, îmbunătățită, pe baza căreia s-a dezvoltat ulterior un algoritm de determinare a caracteristicilor golurilor de tensiune din măsurători reale.

6. Pentru a se putea analiza efectele golurilor de tensiune asupra consumatorului complex a apărut necesitatea de a se realiza un model matematic, cu scopul de a se putea simula comportarea consumatorului complex la diverse perturbații de tensiune. Modelul matematic are la bază descompunerea consumatorului complex în două componente: una statică și una dinamică. Componenta dinamică a fost reprezentată printr-un motor de inducție echivalent, iar componenta statică printr-o admitanță constantă. Modelul matematic dezvoltat pentru componenta dinamică are la bază comportarea motorului de inducție de medie putere, considerat a fi preponderent în structura consumatorului de sistem.

7. Simulatorul MatLab s-a demonstrat a fi un instrument foarte util în simularea comportării motoarelor de inducție la perturbații de tip gol de tensiune. Cu ajutorul componentei sale denumite „Simulink” s-a realizat validarea modelului matematic propus pentru consumatorul complex.

8. Modelul matematic dezvoltat pentru consumatorul complex poate fi folosit și pentru alte aplicații, dintre care merită menționat identificarea parametrilor consumatorului complex, pornind de la înregistrarea curbelor de tensiune și de curent pe durata perturbațiilor de tip gol de tensiune.

9. În lucrare se prezintă un algoritm pentru analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor de sistem, algoritm care are la bază utilizarea unui pachet de programe cu roluri diferite cum ar fi: realizarea bazei de date cu evenimente; prelucrarea datelor înregistrate pentru fiecare eveniment; identificarea consumatorului de sistem dacă acesta nu se cunoaște; determinarea efectelor diferitelor caracteristici ale golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem.

10. În final se aplică toate metodele dezvoltate în teză, pentru a se determina efectele golurilor de tensiune asupra unui consumator de sistem real, o parte din rezultate fiind confirmate de înregistrările reale obținute în urma monitorizării nodului de rețea stabilit.

Dintre contribuțiile aduse de autor în cadrul prezentei teze de doctorat, precizate în lucrare, la finele fiecărui capitol, se remarcă:

Capitolul 2:

- prezentarea într-o manieră personală a principalelor noțiuni privind definirea și standardizarea calității energiei electrice;
- sinteza noțiunilor generale privind golurile de tensiune, realizată printr-un studiu bibliografic intens și de dimensiuni mari;
- analiza critică pe baza de date IEEE, privind studiul golurilor de tensiune din punct de vedere a problemelor generale, dar mai ales extragere și analiza mai detaliată a principalelor articole legate de tematica acestei teze.

Capitolul 3:

- prezentarea într-o manieră mai structurată a prevederilor standardului EN50610-1999, privind problemele generale legate de perturbațiile electromagnetice, cum ar fi definirea acestora, clasificarea lor, definirea nivelurilor de compatibilitate electromagnetică;
- realizarea unui algoritm de analiză a unei sarcini perturbatoare;
- structurarea problemelor legate de calitatea tensiunii furnizate de către distribuitorul de energie electrică, precum și prezentarea principalilor indicatori care caracterizează calitatea tensiunii electrice furnizate;
- realizarea unui studiu de caz privind calitatea tensiunii electrice furnizate municipiului Reșița, care s-a realizat pe barele de medie tensiune din stația de

ÎT/MT Bârzava, precum și la bornele de joasă tensiune a postului de transformare PT160;

- monitorizarea calității tensiunii cu trei sisteme de monitorizare diferite (*NEXUS 1250* de producție americană, *TRINET* de producție românească și *Sistem de monitorizare cu placă de achiziție PCI-6023* realizat cu placă de achiziție de producție National Instruments, de către colectivul catedrei de Electroenergetică din Timișoara sub conducerea prof.dr.ing. Adrian BUTĂ), care a avut drept scop găsirea diferențelor de realizare a normelor de calitate a tensiunii electrice, care apar datorită utilizării diferitelor standarde pentru realizarea sistemelor de monitorizare.

Capitolul 4:

- analiza prevederilor standardelor internaționale privind limitele mărimilor caracteristice ale golurilor de tensiune;
- studiul și selectarea critică a metodelor de clasificare a golurilor de tensiune, precum și a metodelor de determinare a caracteristicilor golurilor de tensiune obținute din achiziționarea curbelor de tensiune cu diferite tipuri de echipamente de monitorizare;
- compararea metodelor existente în literatură pentru a arăta necesitatea continuării studiilor pe această temă;
- dezvoltarea unei metode proprii și pe baza ei a unui *algoritm original* de determinare a tipului golului de tensiune conform clasificării ABC. Acest algoritm este cu atât mai important cu cât în studiile din domeniu nu este prezentat un algoritm concret pentru determinarea tipului golurilor de tensiune conform acestei clasificări;
- compararea rezultatelor obținute cu acest algoritm, cu rezultatele obținute cu celelalte metode prezentate în acest capitol, ceea ce a condus la validarea procedurii și algoritmului dezvoltat.

Capitolul 5:

- elaborarea unui model matematic complet al unui consumator complex, care să poată fi utilizat la analiza efectelor golurilor de tensiune asupra acestuia;
- dezvoltarea, în programul Simulink din mediul MATLAB, a unei aplicații de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului complex;
- validarea modelului matematic dezvoltat prin compararea rezultatelor obținute pentru o perturbație dată, cu cele obținute cu un alt model matematic consacrat și general acceptat (MATLAB);
- identificarea și expunerea unei aplicații suplimentare dar foarte utile, la care poate fi utilizat modelul matematic dezvoltat, și anume estimarea parametrilor unui consumator complex;
- am determinat ordinea optimă de estimare a parametrilor motorului echivalent, dar și o procedură de inițializare a parametrilor, două lucruri foarte importante în realizarea convergenței metodei celor mai mici pătrate forma generalizată, folosită pentru estimarea parametrilor consumatorului complex.

Capitolul 6:

- realizarea unui *algoritm original* privind metoda de analiză a efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem;
- realizarea unei baze de date cu înregistrări efectuate la bornele unor consumatori de sistem, care are marele avantaj că pune la dispoziție informația în formate internaționale standardizate cum ar fi: *.XLS, COMTRADE, *.TXT;

- realizarea unui program care să permită o prelucrare a semnalelor înregistrate la bornele unui consumator de sistem, astfel încât să se obțină atât mărimile electrice de interes cât și caracteristicile golului de tensiune care a afectat consumatorul;
- realizarea unui program pentru identificarea consumatorilor de sistem pornind de la utilizarea fișierelor înregistrate pe durata golurilor de tensiuni, precum și identificarea unui consumator de sistem;
- analiza efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorului de sistem identificat, precum și prezentarea celor mai rele efecte ce le poate avea acestea din punct de vedere al valorii curenților ce se pot stabili la bornele acestuia.

Rezultatele cercetării au fost valorificate în cadrul unor contracte de cercetare științifică încheiate între Universitatea „Politehnica” din Timișoara și S.C. Electrica Banat S.A. sau în cadrul unor programe naționale de cercetare derulate de Ministerul Educației și Cercetării: MENER, CEEX, RELANSIN. Până în prezent s-au derulat 5 astfel de contracte [***2004a], [***2004b], [***2004c], [***2004d], [***2005], dintre care unul [***2005], a obținut în anul 2007 premiul III al Autorității Naționale pentru Cercetare Științifică.

De asemenea, cea mai mare parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate și sunt în curs de publicare. Se menționează faptul că din totalul de 14 lucrări proprii, 7 au fost publicate și prezentate în volumele unor manifestări științifice de prestigiu din străinătate [Balint2005], [Moga2007], [Moga2008b], [Moga2009], [Pană2007a], [Pană2007b], [Toader2005], iar două sunt în curs de publicare în volumele unor manifestări științifice de prestigiu din străinătate [Molnar2010a], [Molnar2010b].

În contextul progresului tehnicii de calcul și a IT-ului, studiul teoretic și practic realizat în cadrul tezei de doctorat conduce la recomandarea privind implementarea software a metodelor dezvoltate în cadrul acestei teze, în cadrul echipamentelor de monitorizare, automatizare și protecție a rețelelor electrice. Acest lucru este benefic atât din punct de vedere a monitorizării golurilor de tensiune care au loc în sistemul electroenergetic, cu aplicații diverse în studiul acestora, precum și pentru anticiparea efectelor golurilor de tensiune asupra consumatorilor din sistemul electroenergetic. În acest sens se impune o achiziție on-line de valori corespunzătoare tensiunilor în toate nodurile rețelei electrice precum și a curenților pe liniile radiale la bornele cărora se pot echivala consumatorii complecși. În final cu ajutorul acestor informații prelucrate conform celor dezvoltate în această lucrare se pot lua decizii privind proiectarea rețelei electrice și parametrizarea echipamentelor de automatizare și protecție.

Dintre direcțiile de cercetare în viitor, pe această temă, se evidențiază implementarea unor metode mai avansate de prelucrare a semnalelor cum ar fi filtrele Kalman cu ajutorul cărora se poate determina zgomotele de semnal, și mai important se pot utiliza ca și tehnică de estimare a semnalului pentru aplicații de monitorizare on-line. De asemenea, se are în vedere și se va studia problema implementării algoritmului dezvoltat într-un sistem de monitorizare on-line. Din punct de vedere al metodei de determinare a caracteristicilor golurilor de tensiune, studiul va continua în direcția de implementare a tehnicilor de inteligență artificială.

ANEXA 1 – MĂSURĂTORI ȘI PRELUCRĂRI PENTRU ANALIZA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE.

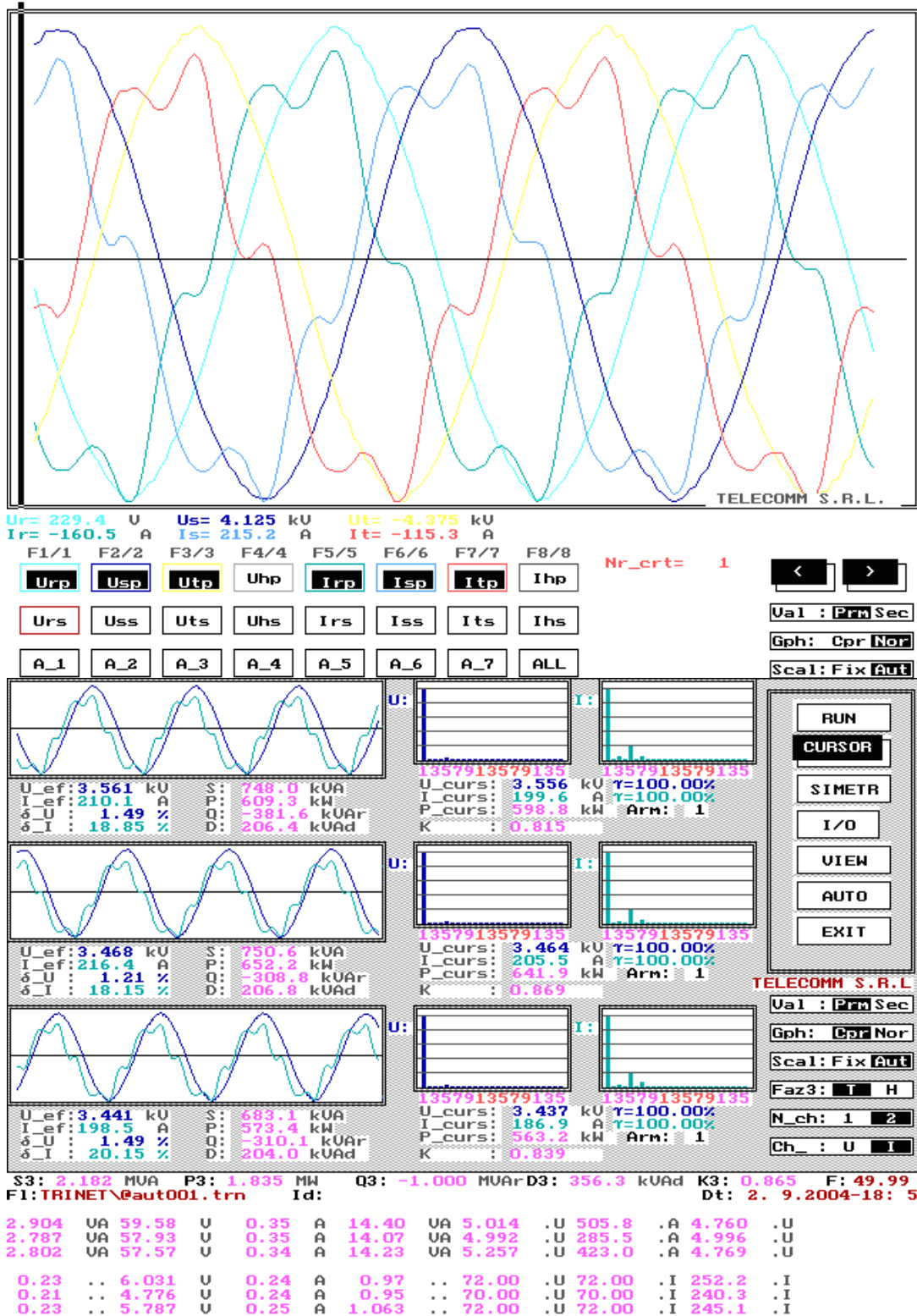


Fig.A1.1.a) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.05 – fișier Bârzava

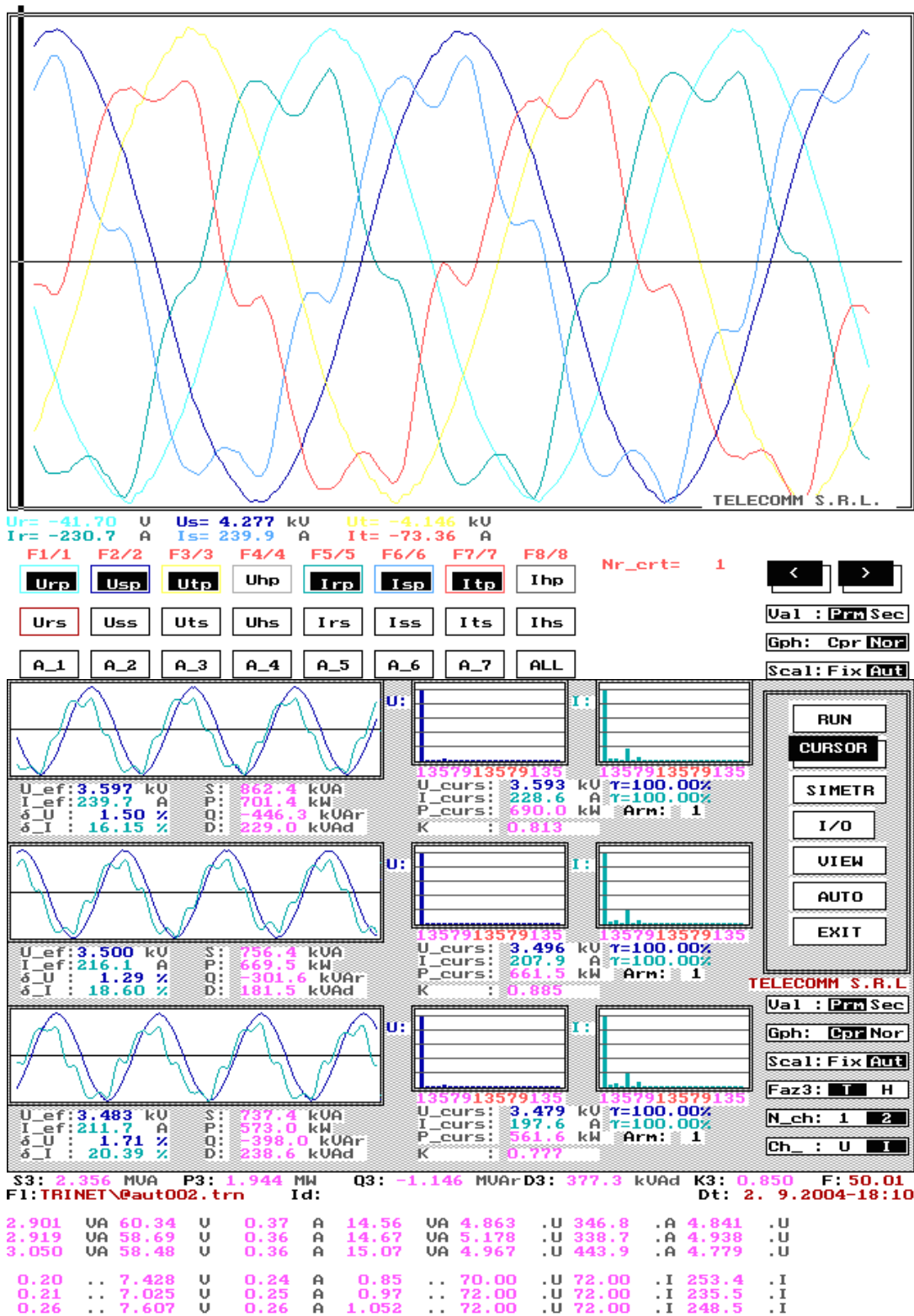


Fig.A1.1.b) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.10

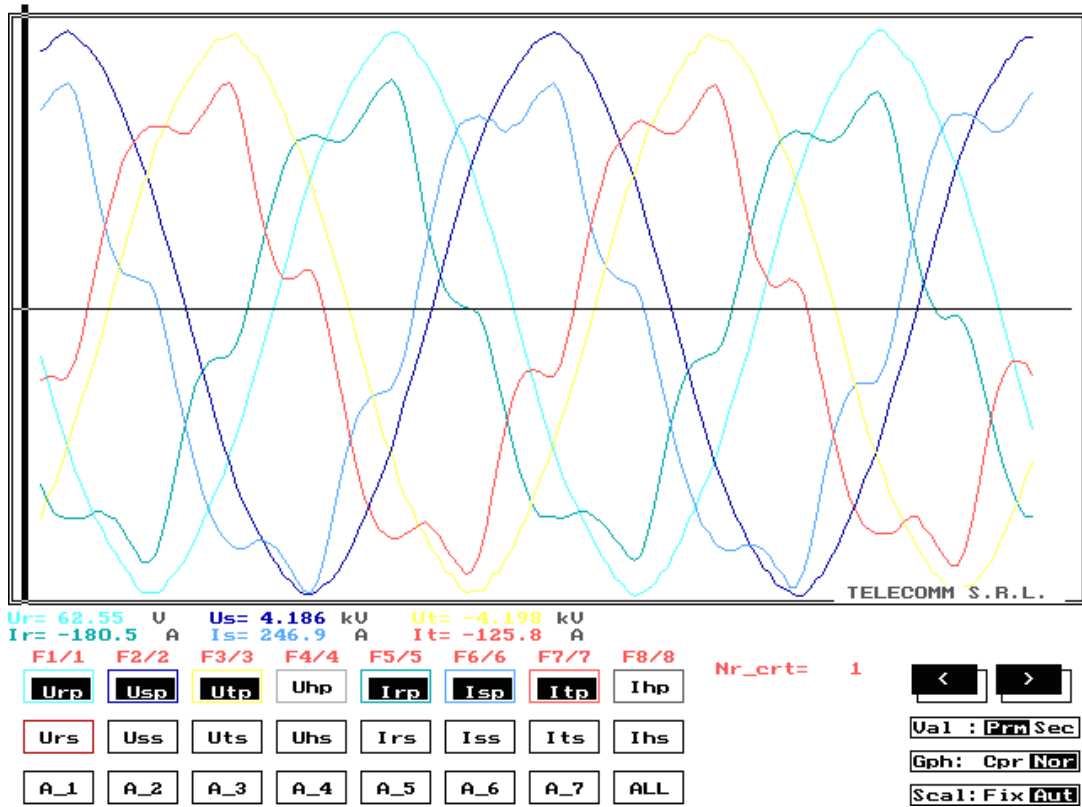


Fig.A1.1.c) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.15

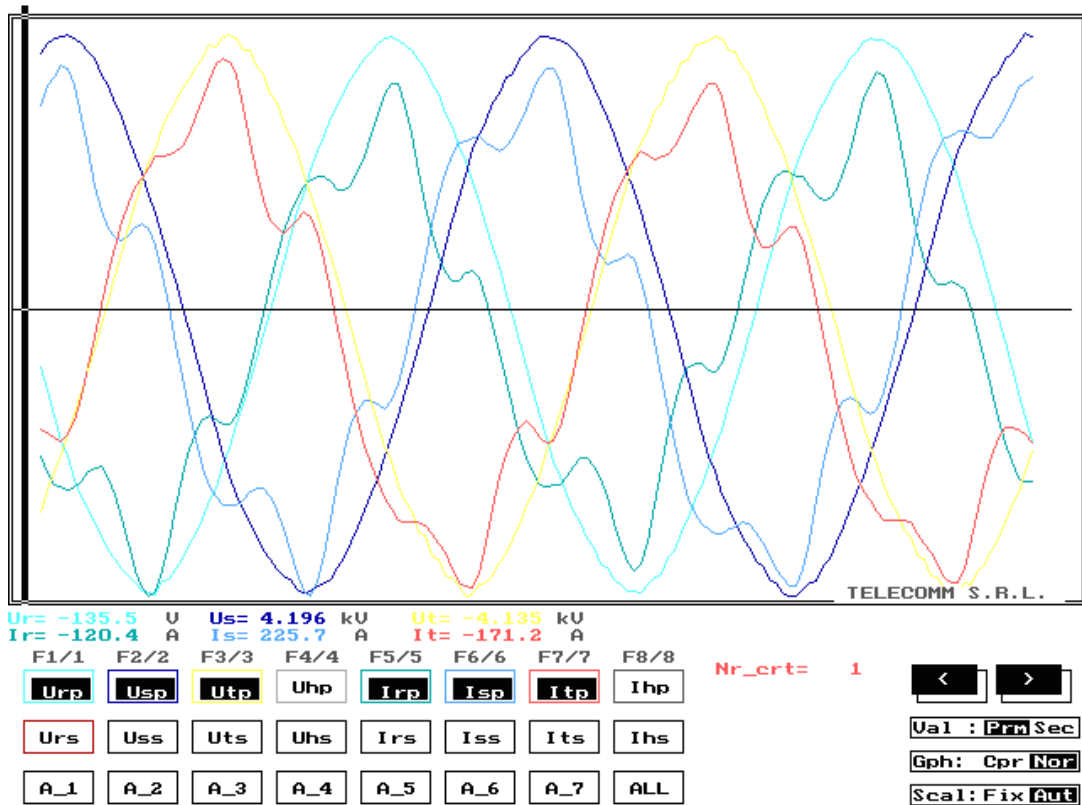


Fig.A1.1.d) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.20

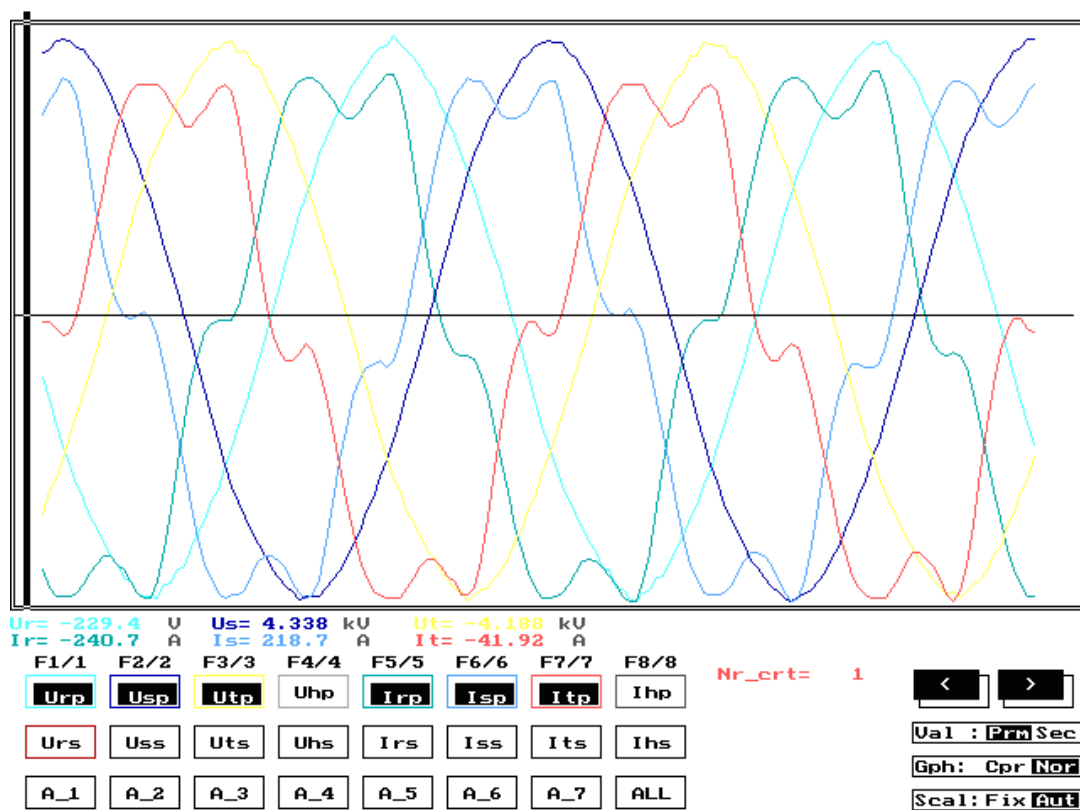


Fig.A1.1.e) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.25

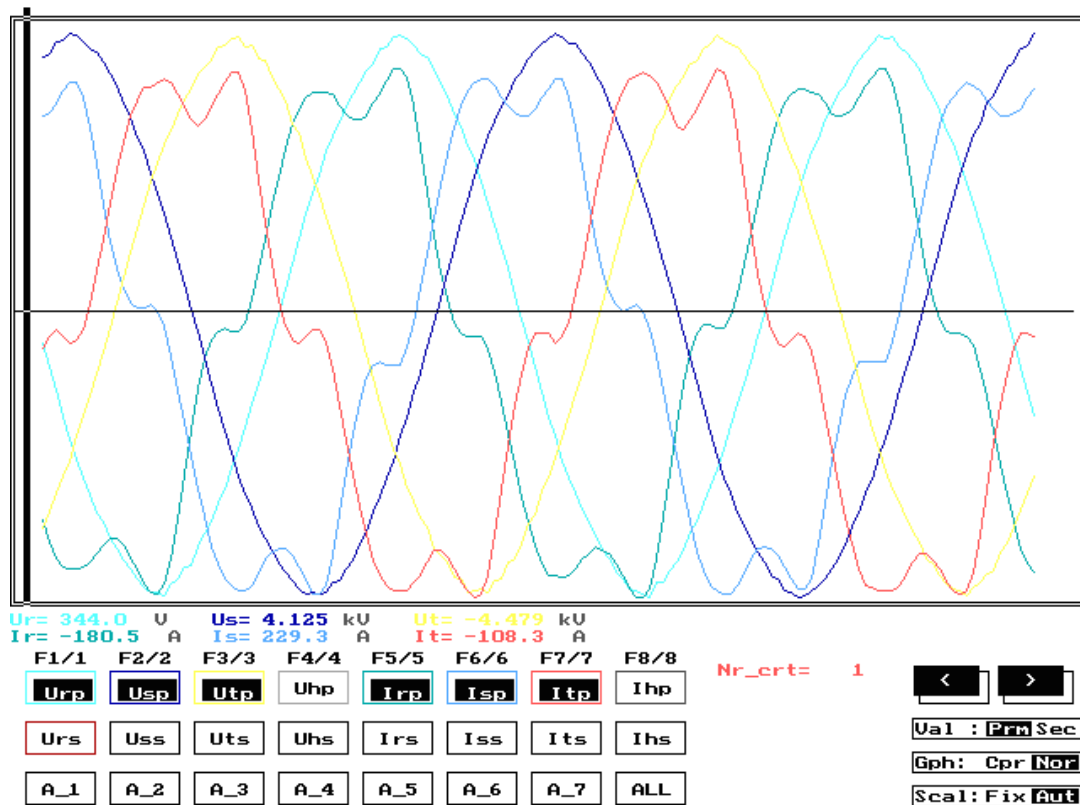


Fig.A1.1.f) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.30

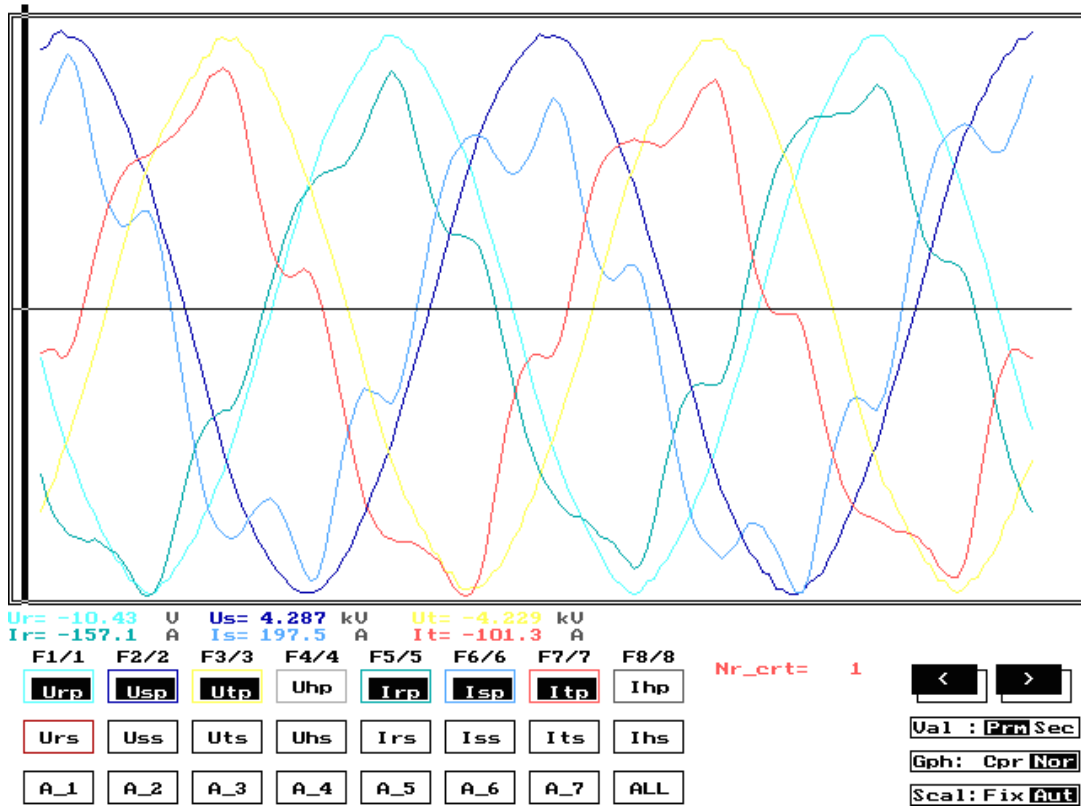


Fig.A1.1.g) Măsurători Reșița -2 septembrie 2004 ora 18.35

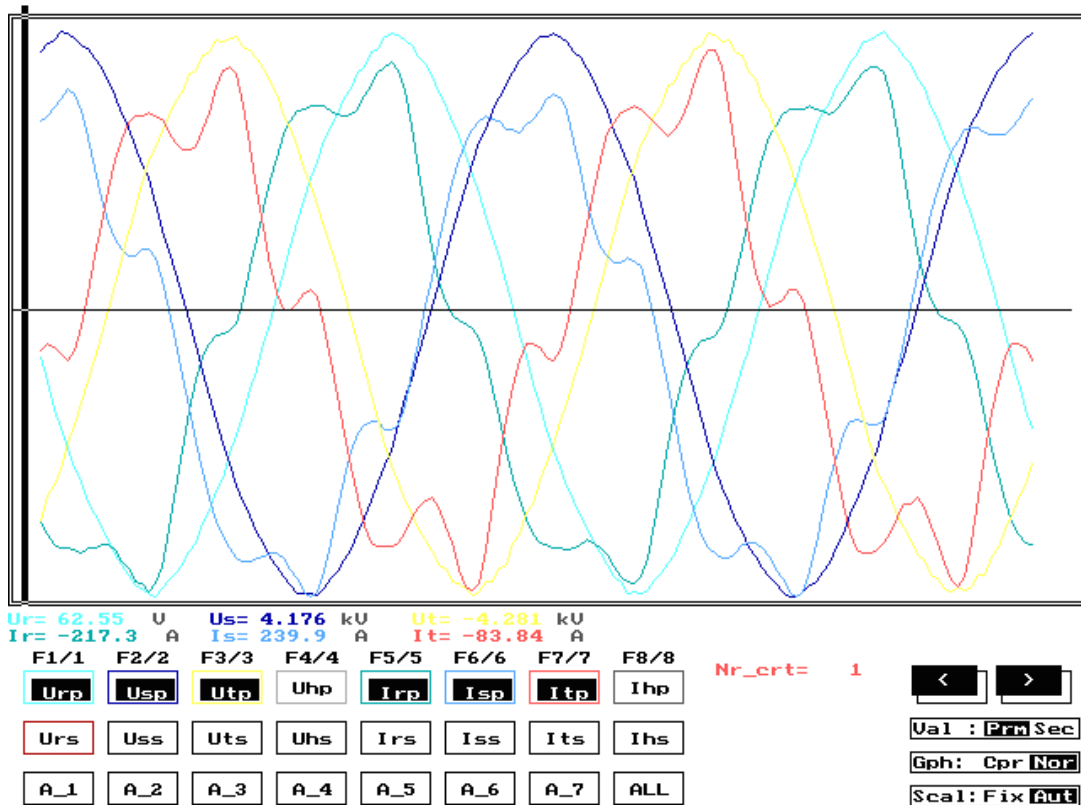


Fig.A1.1.h) Măsurători Reșița - 2 septembrie 2004 ora 18.40

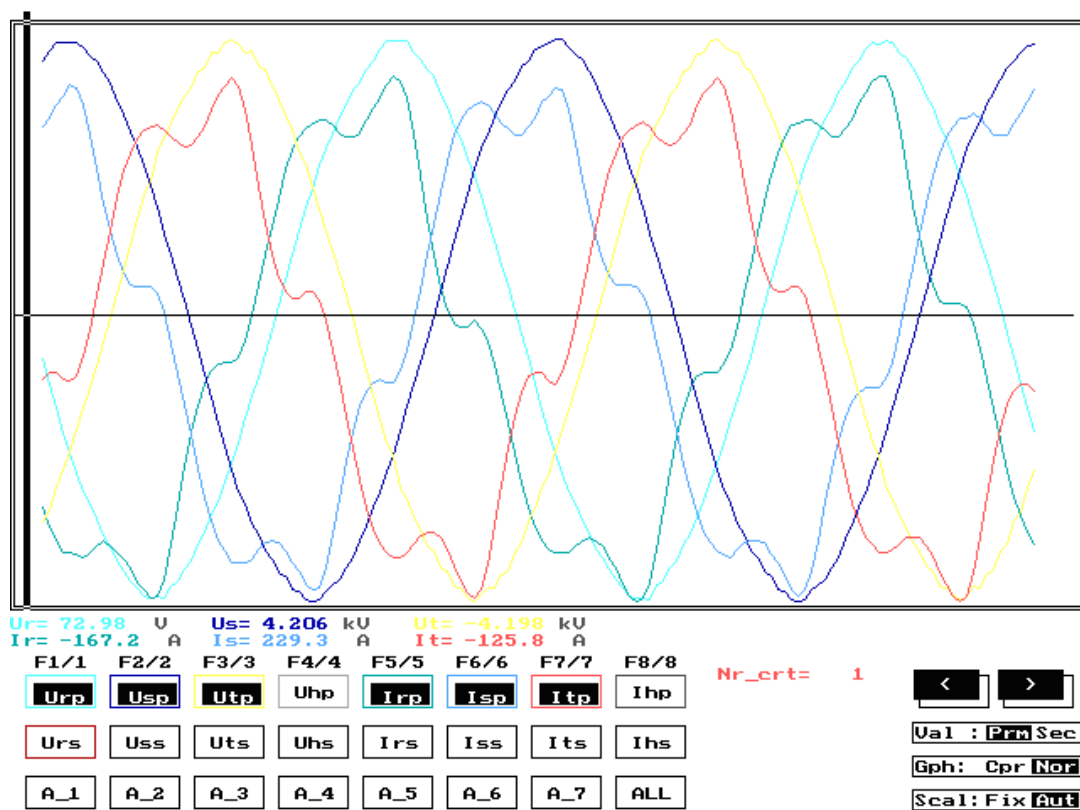


Fig.A1.1.i) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.45

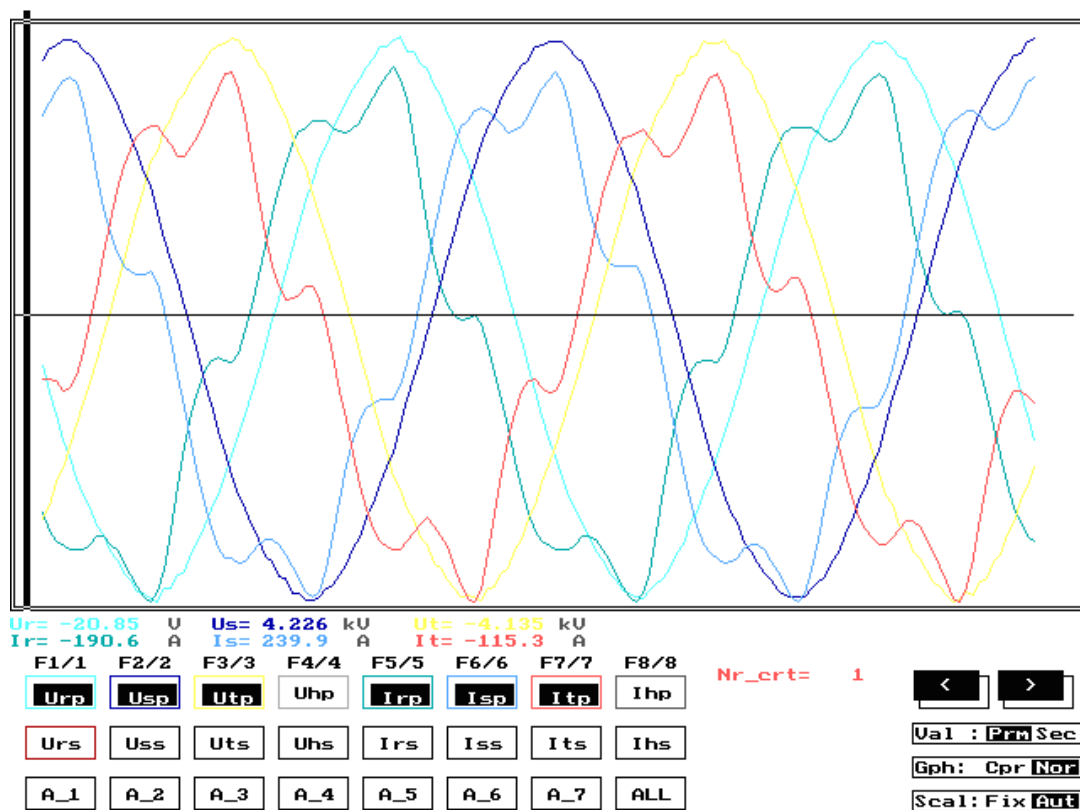


Fig.A1.1.j) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 18.50

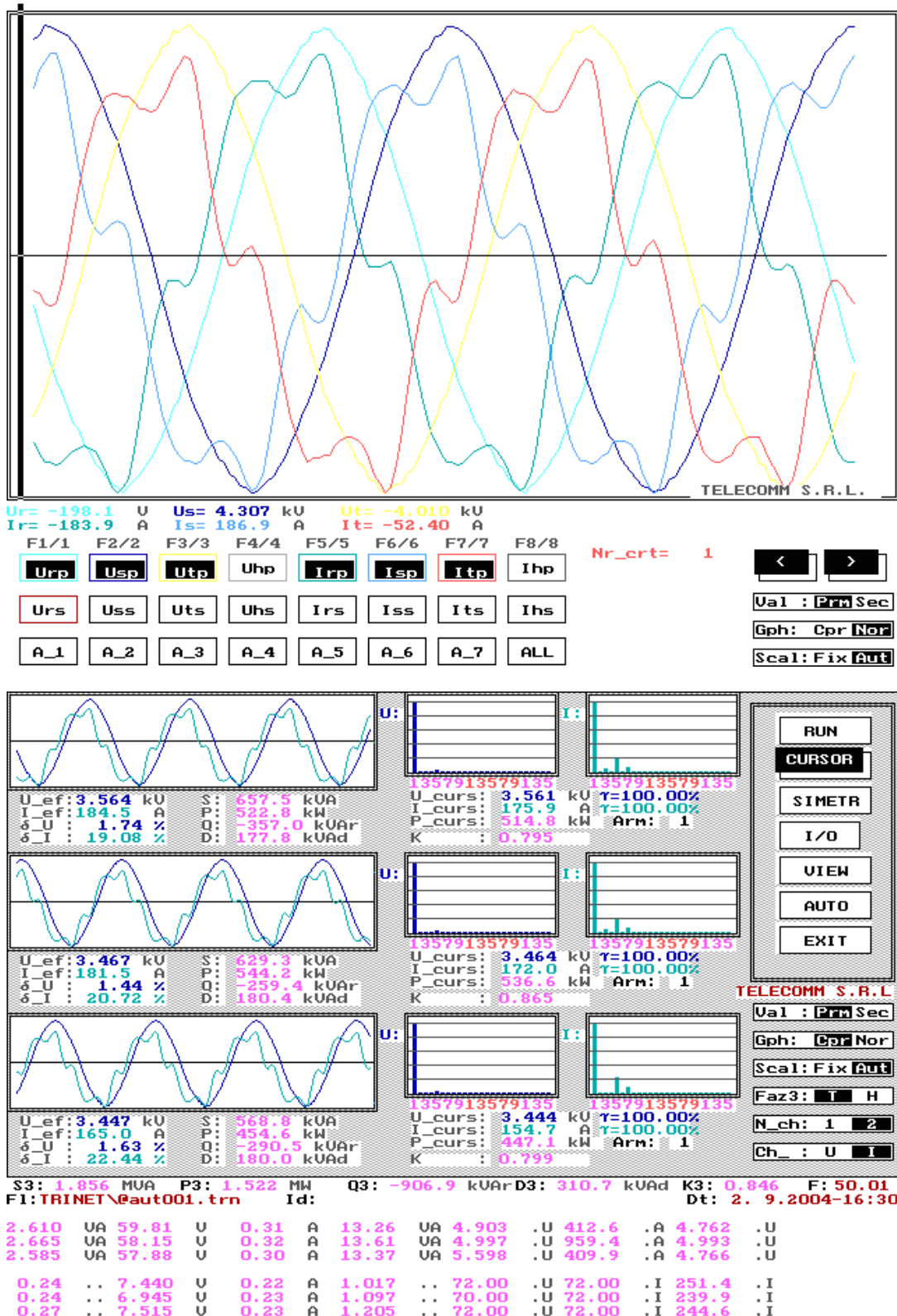


Fig.A1.2.a) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.30 – fișier Barzava_prim

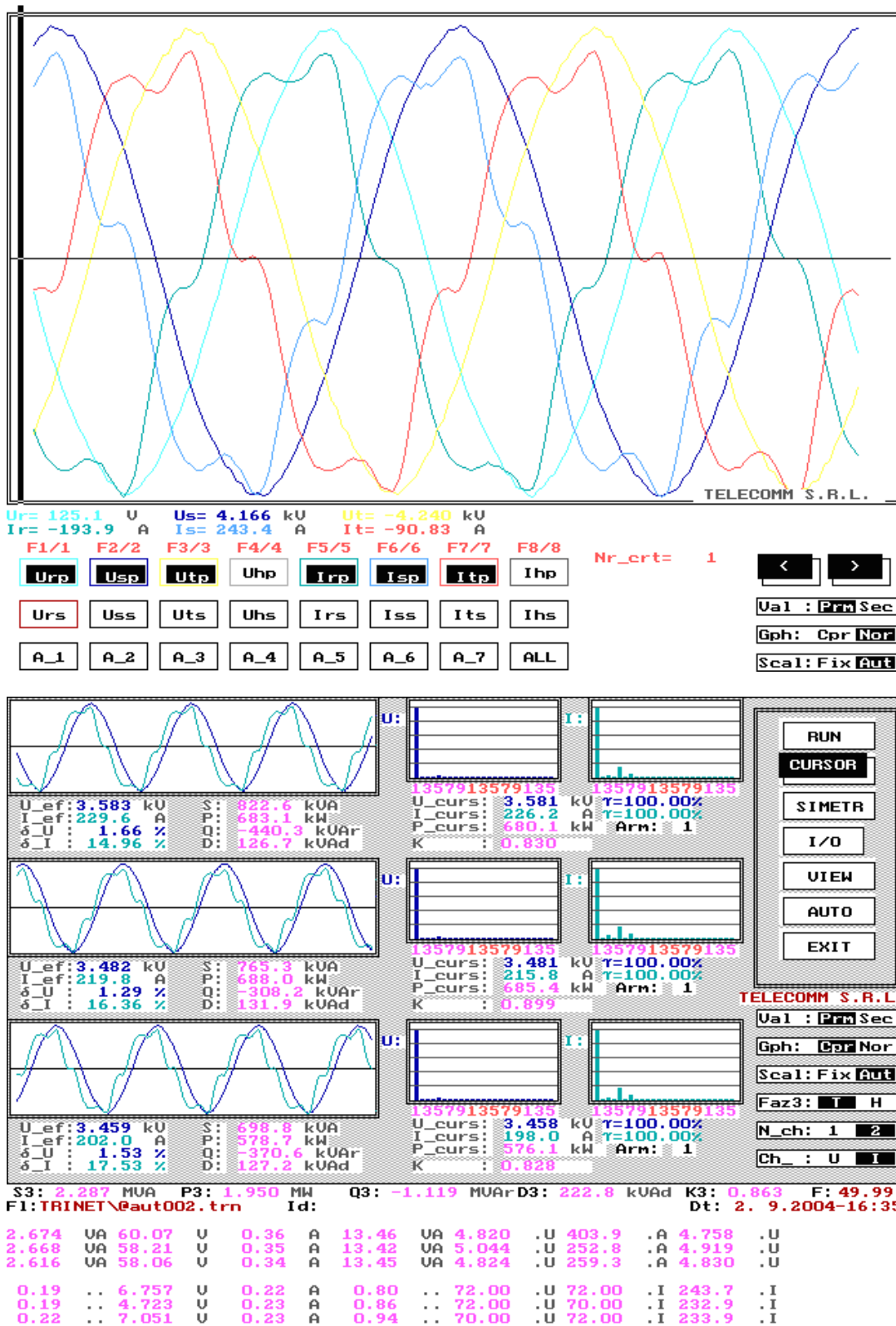


Fig.A1.2.b) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.35

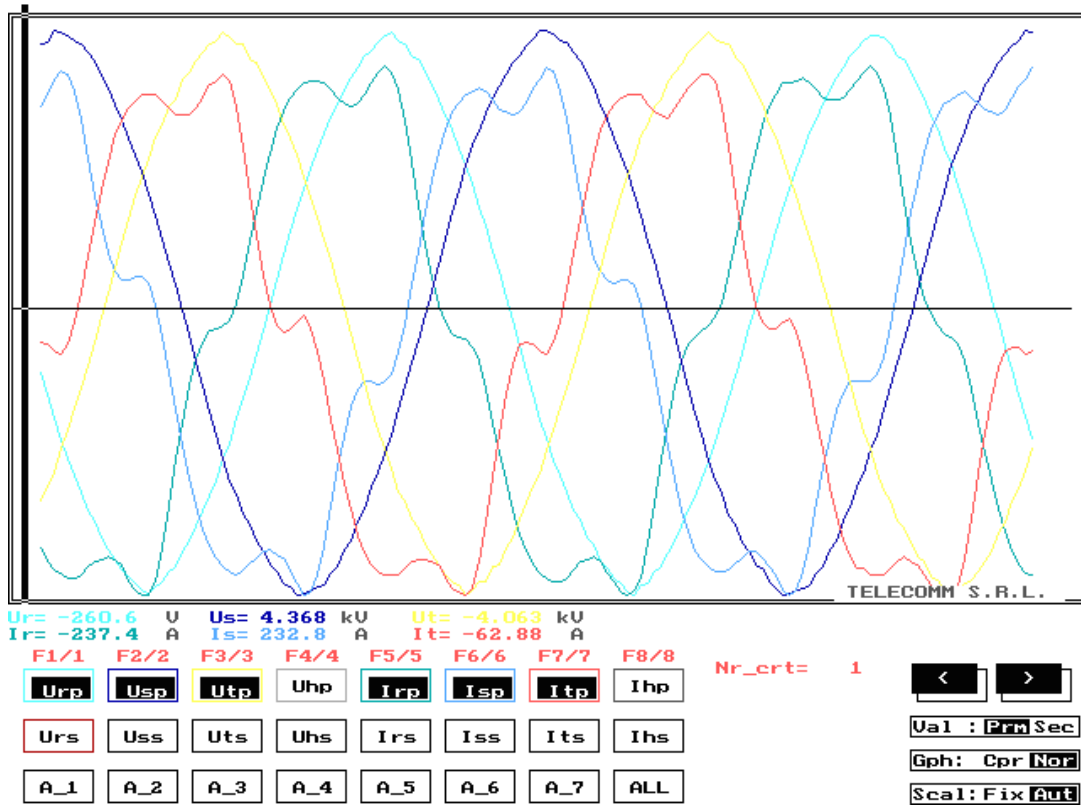


Fig.A1.2.c) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.40

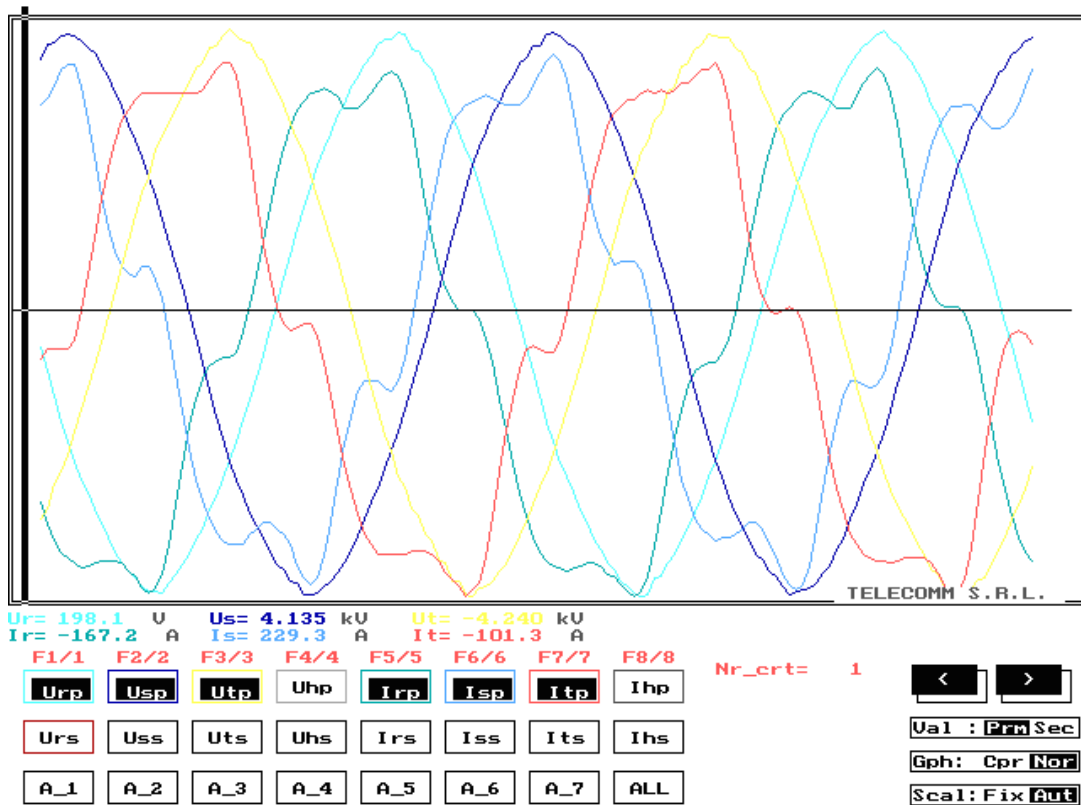


Fig.A1.2.d) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.45

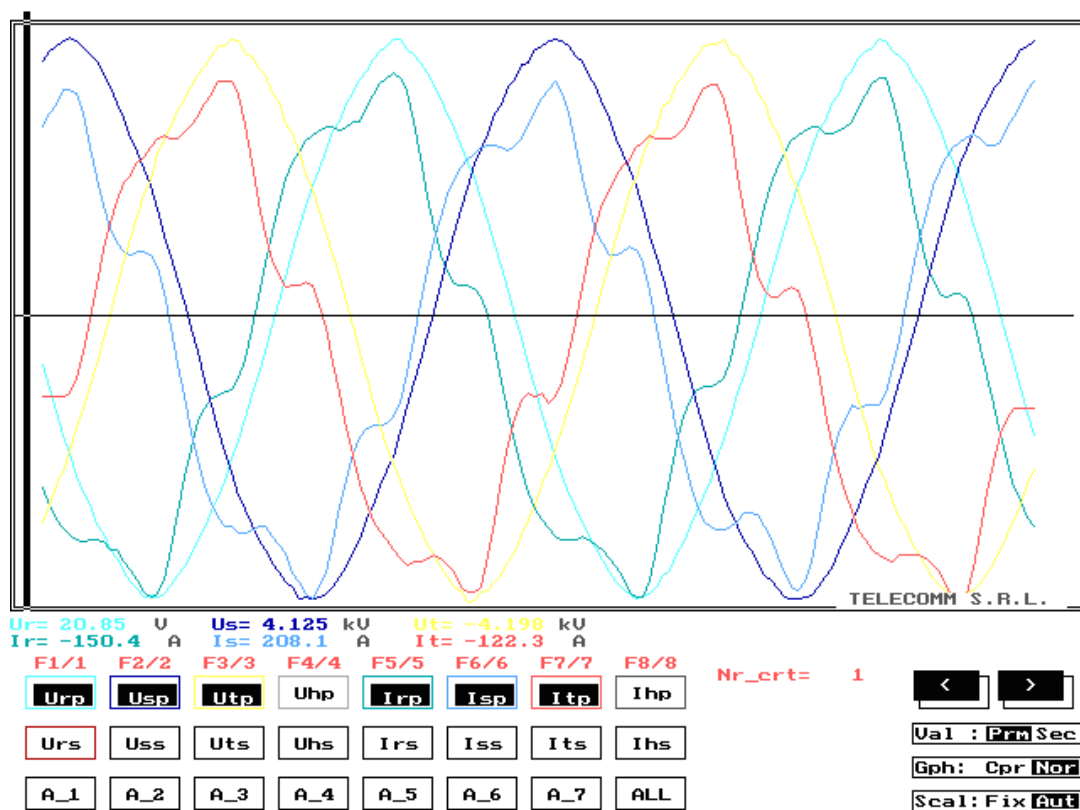


Fig.A1.2.e) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.50

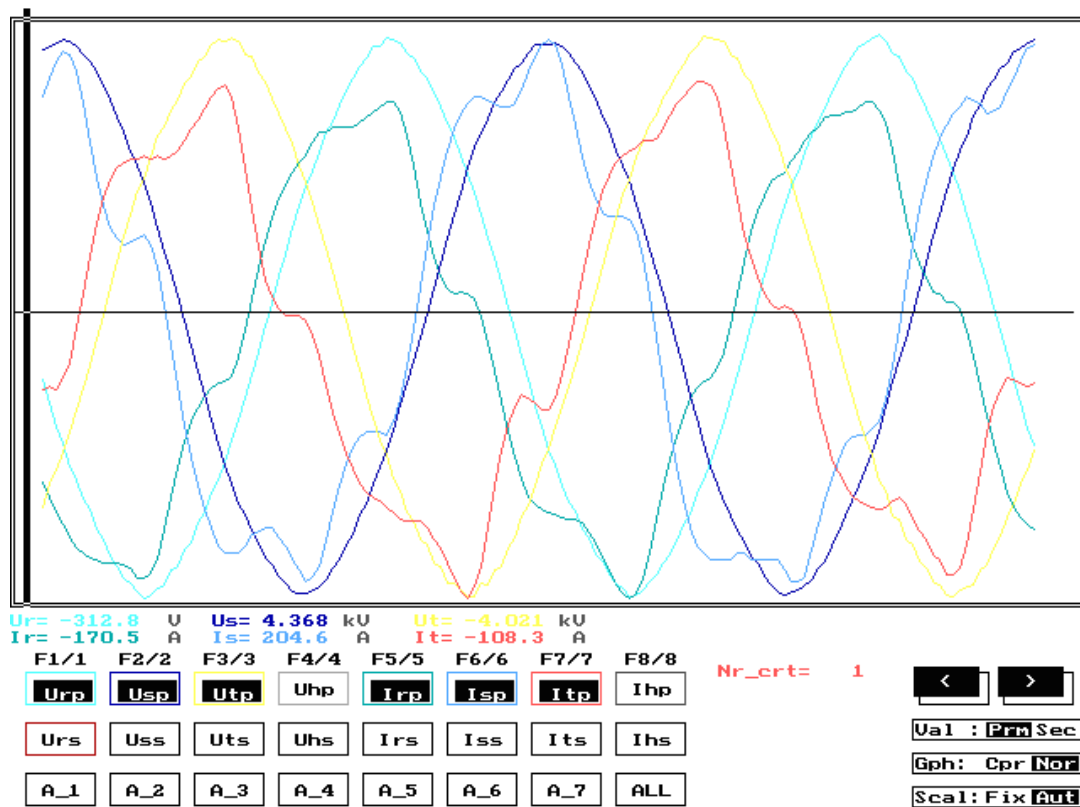


Fig.A1.2.f) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 16.55

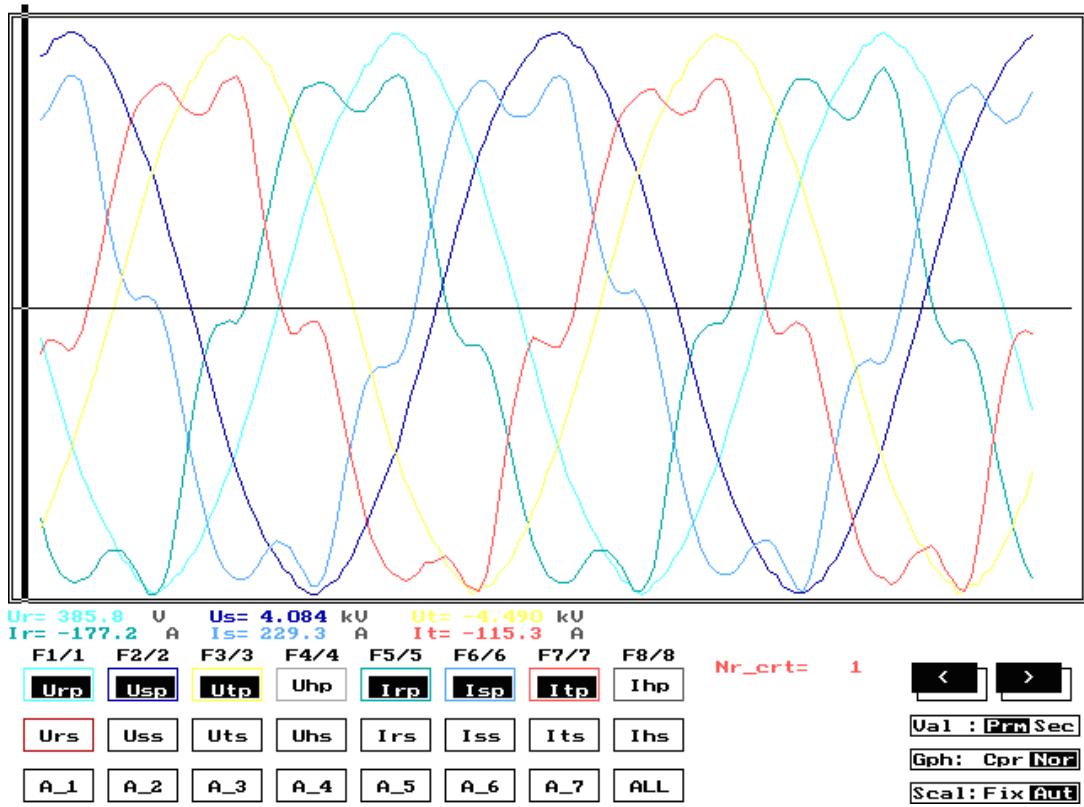


Fig.A1.2.g) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 17.00

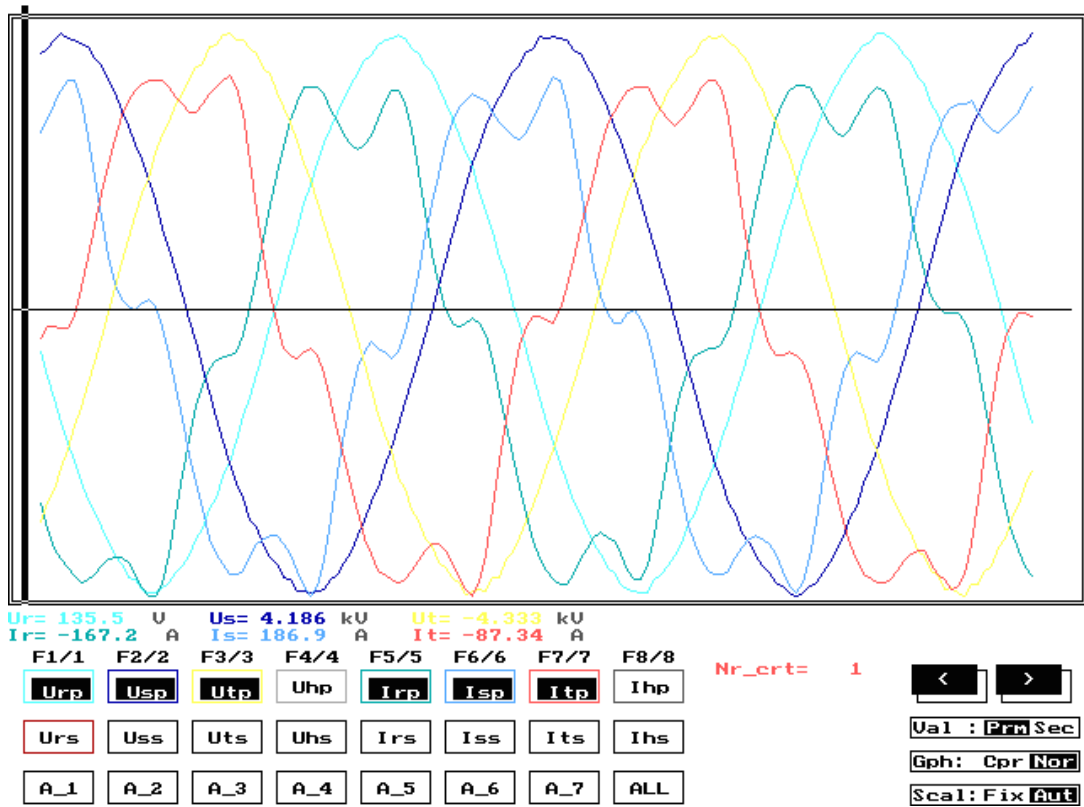


Fig.A1.2.h) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 17.05

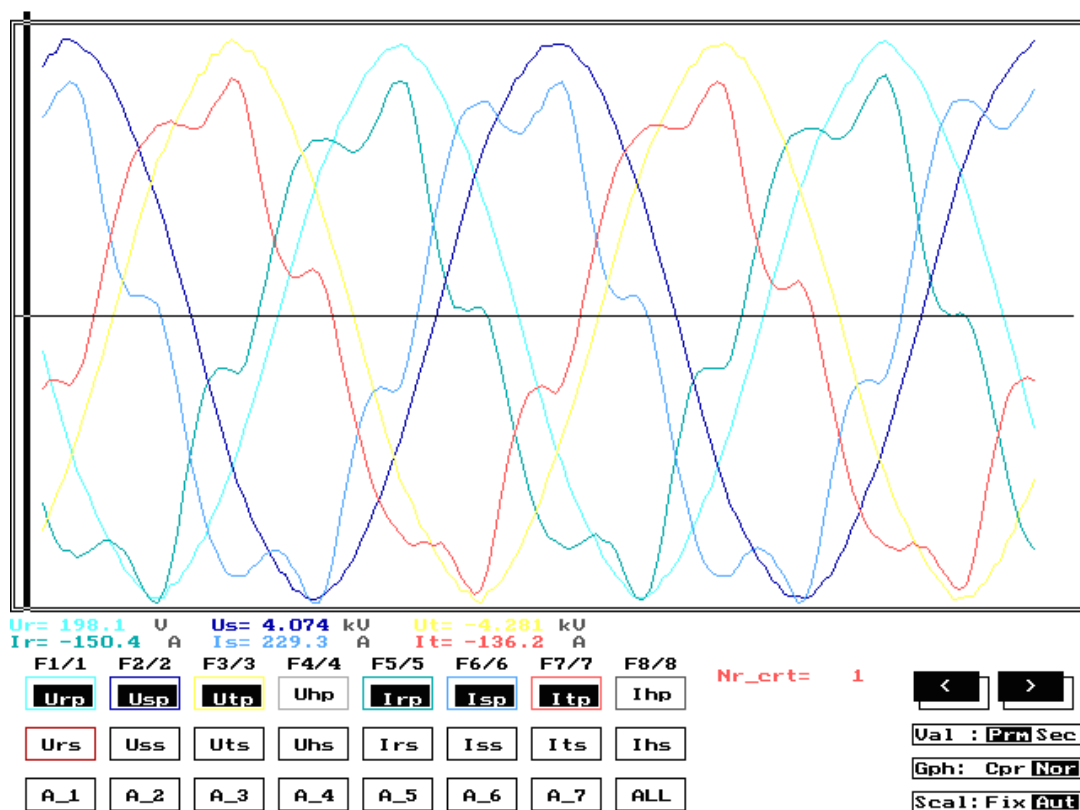


Fig.A1.2.i) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 17.10

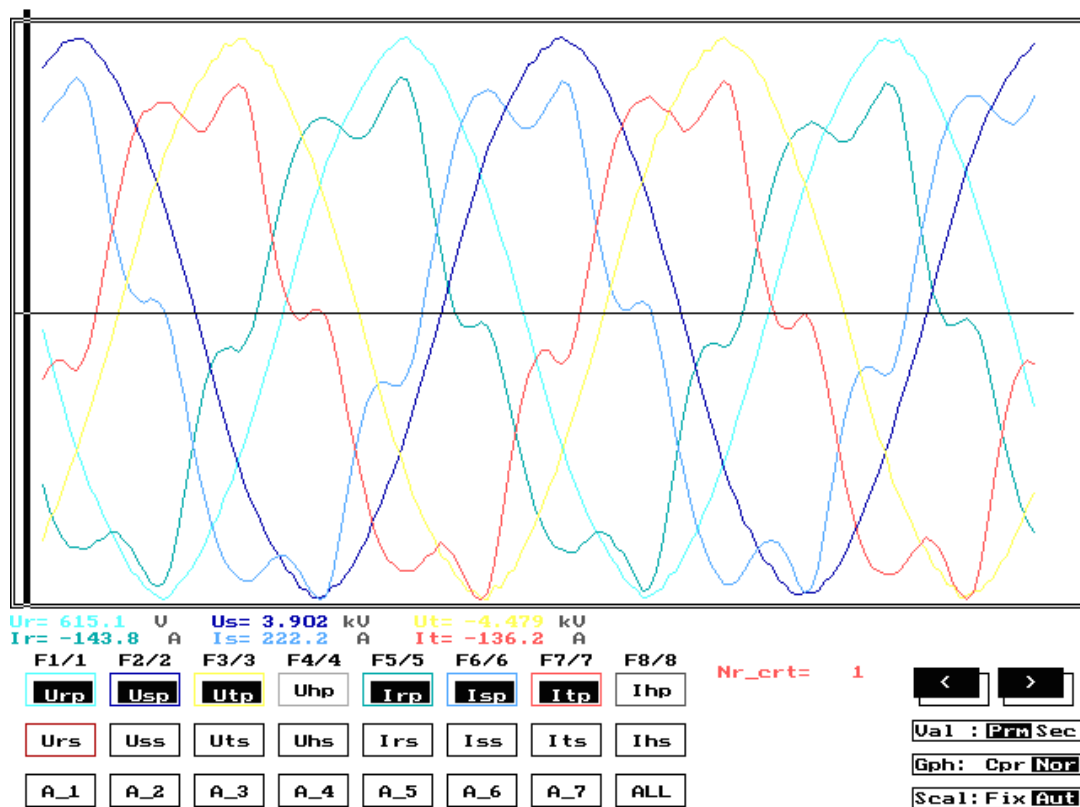


Fig.A1.2.j) Măsurători Reșița – 2 septembrie 2004 ora 17.15

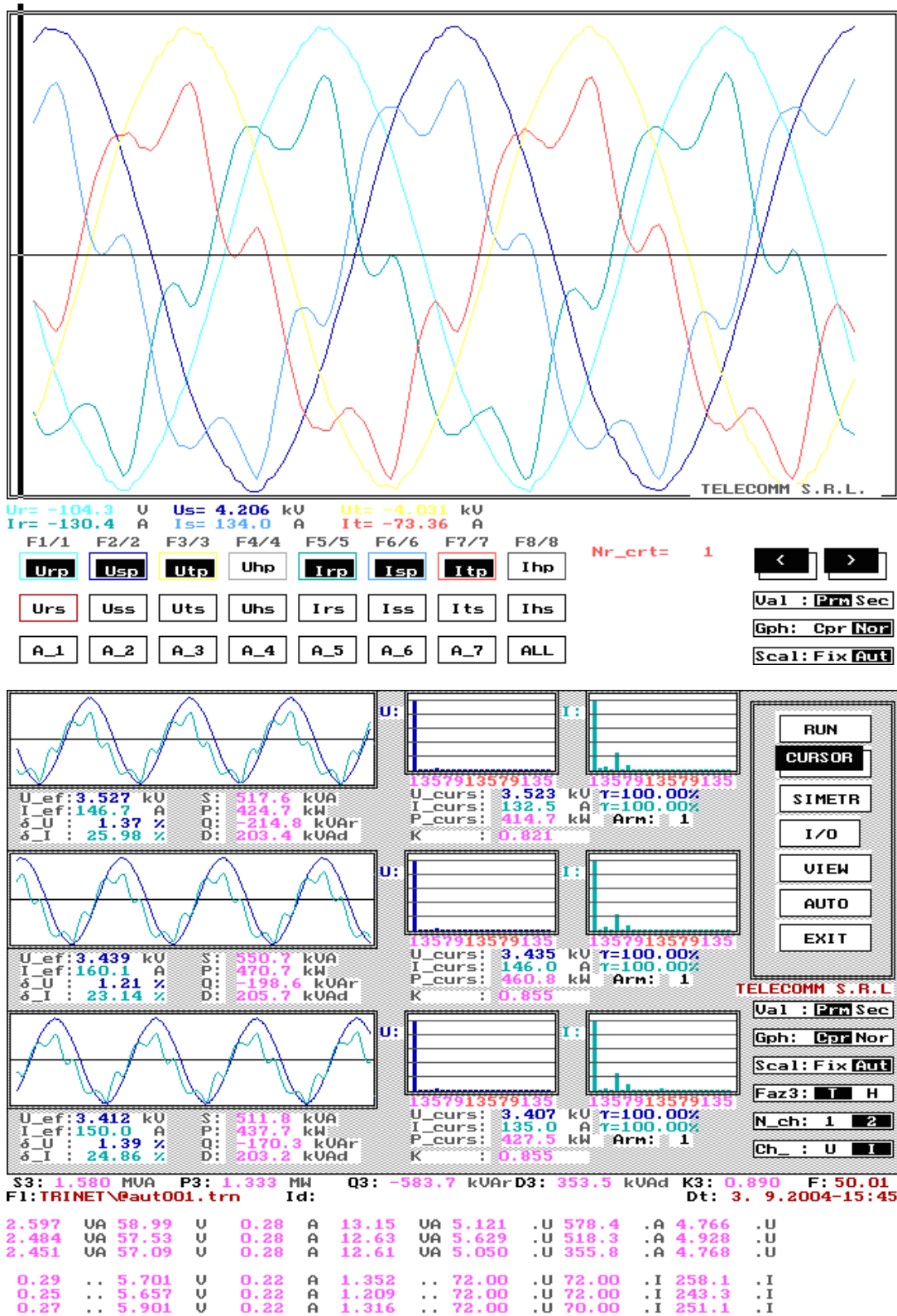


Fig.A1.3.a) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 15.45 – fișier Barzava-1

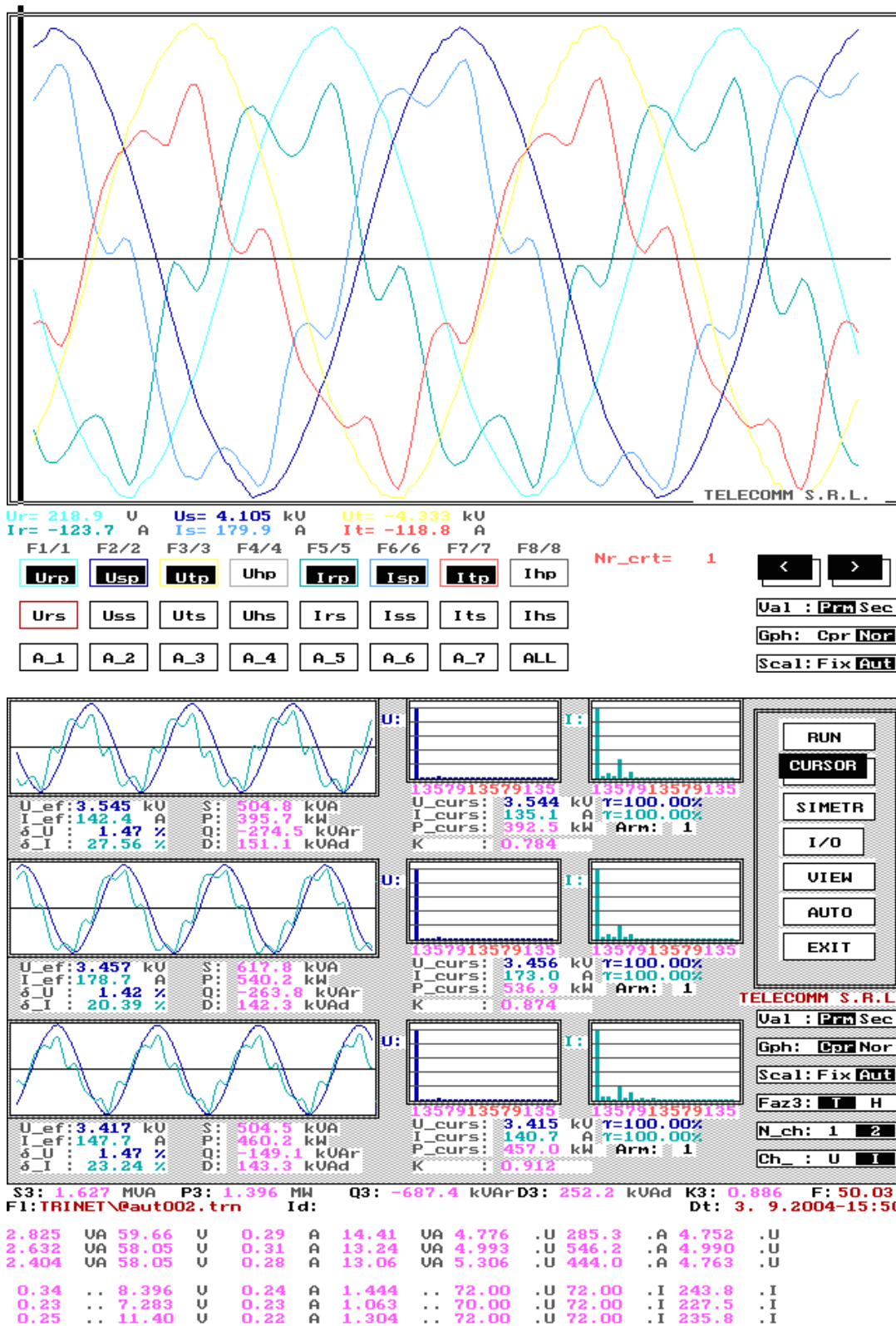


Fig.A1.3.b) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 15.50

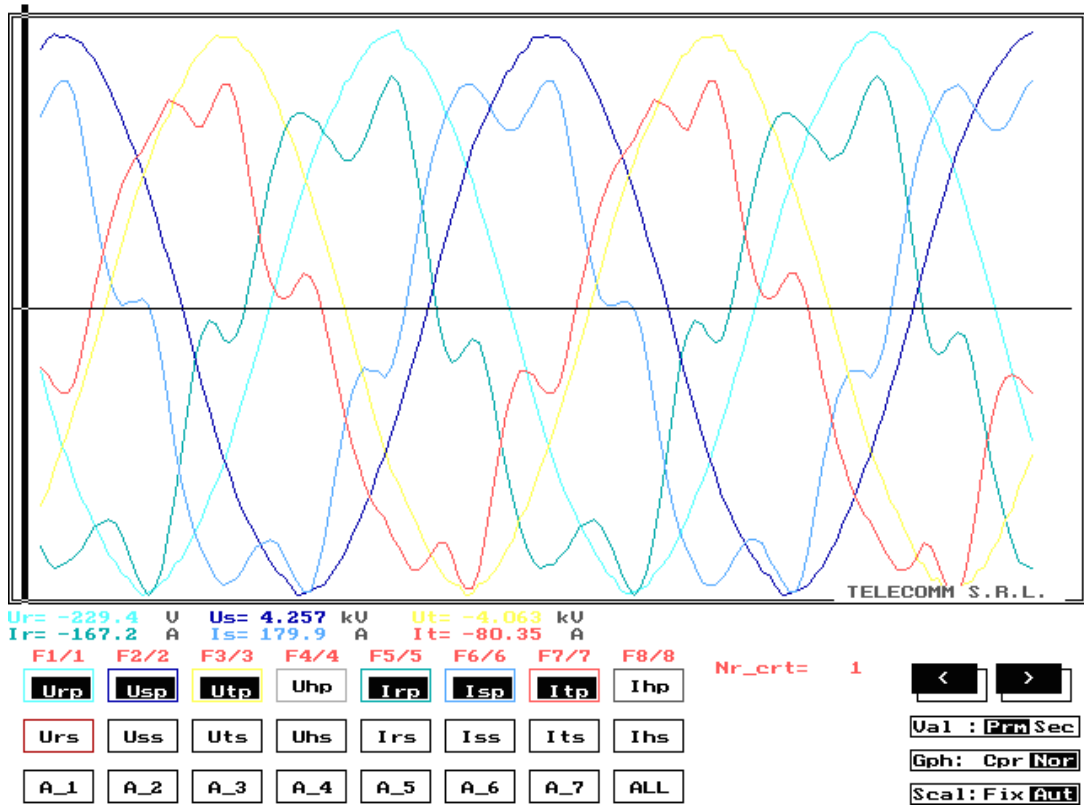


Fig.A1.3.c) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 15.55

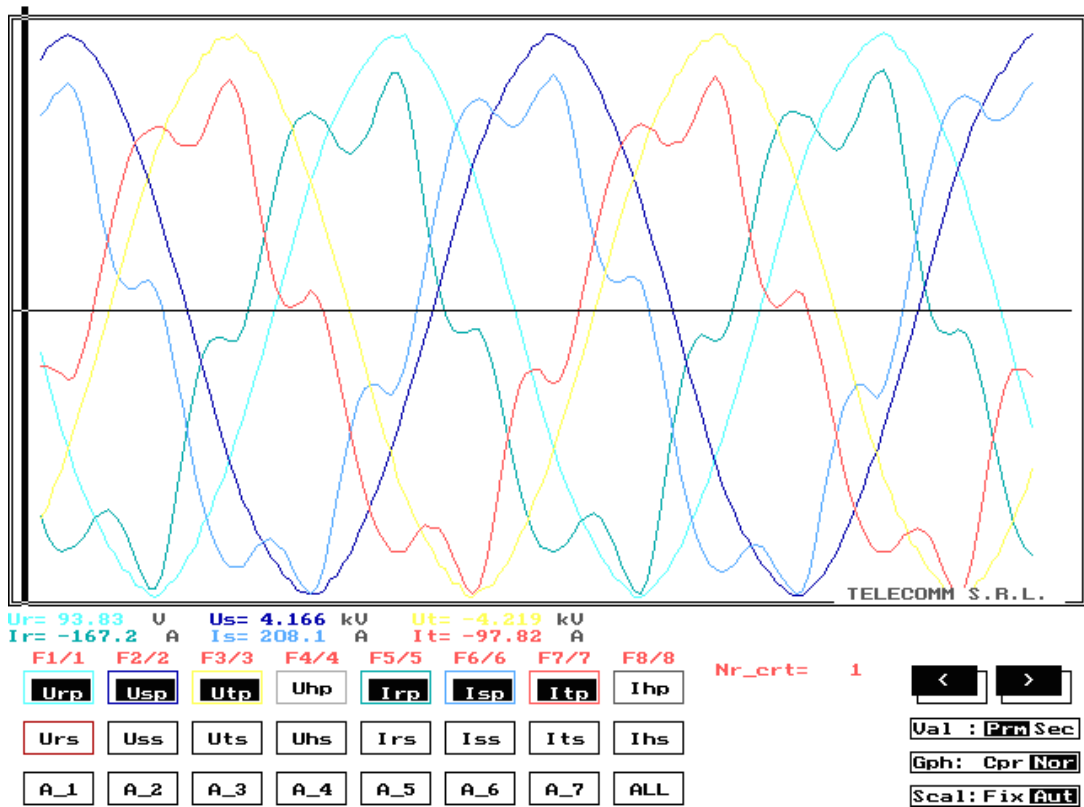


Fig.A1.3.d) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.00

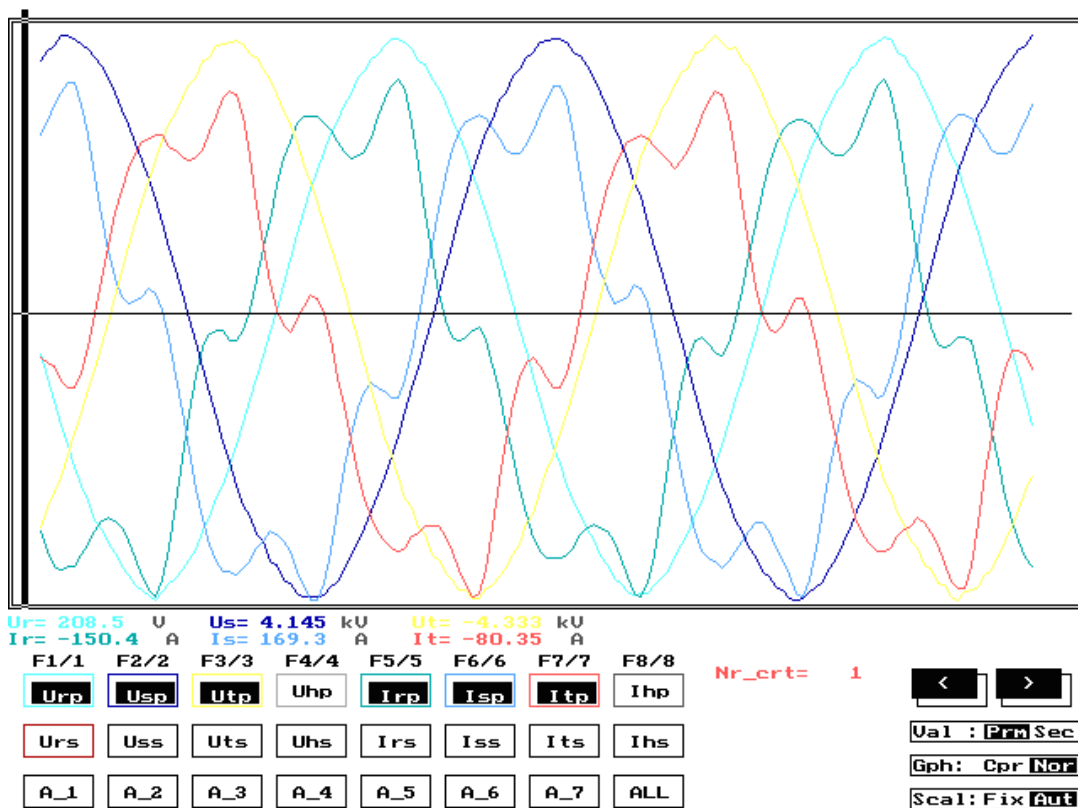


Fig.A1.3.e) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.05

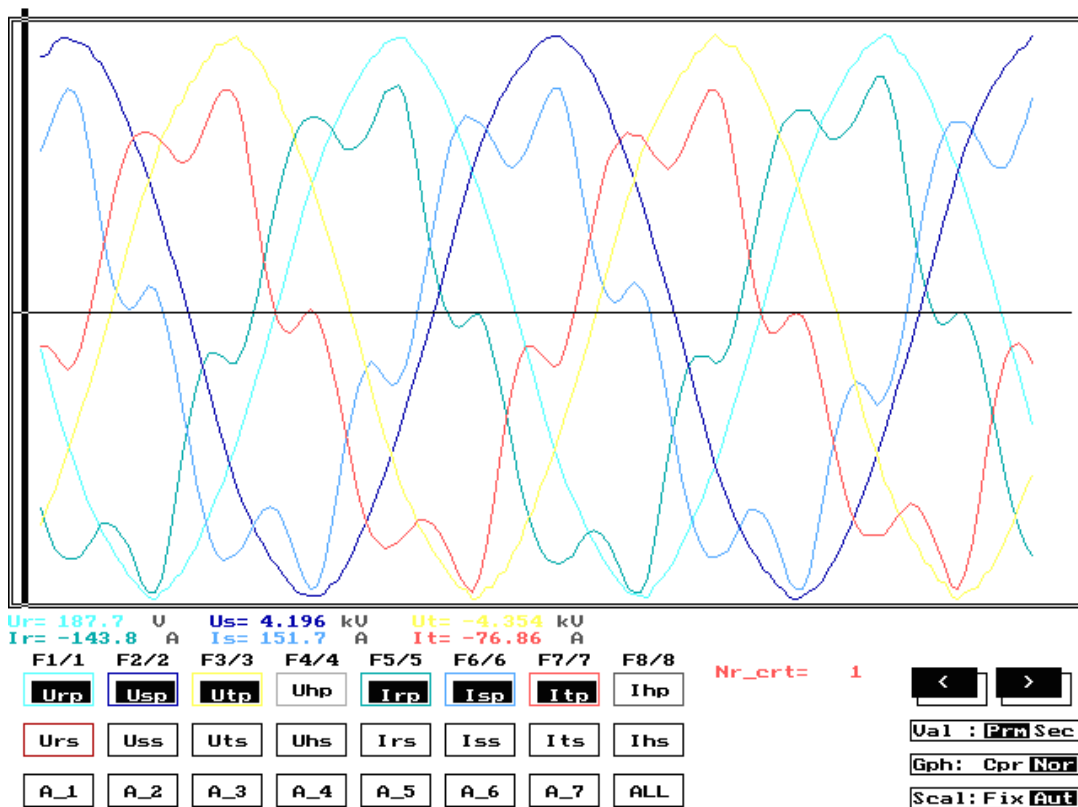


Fig.A1.3.f) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.10

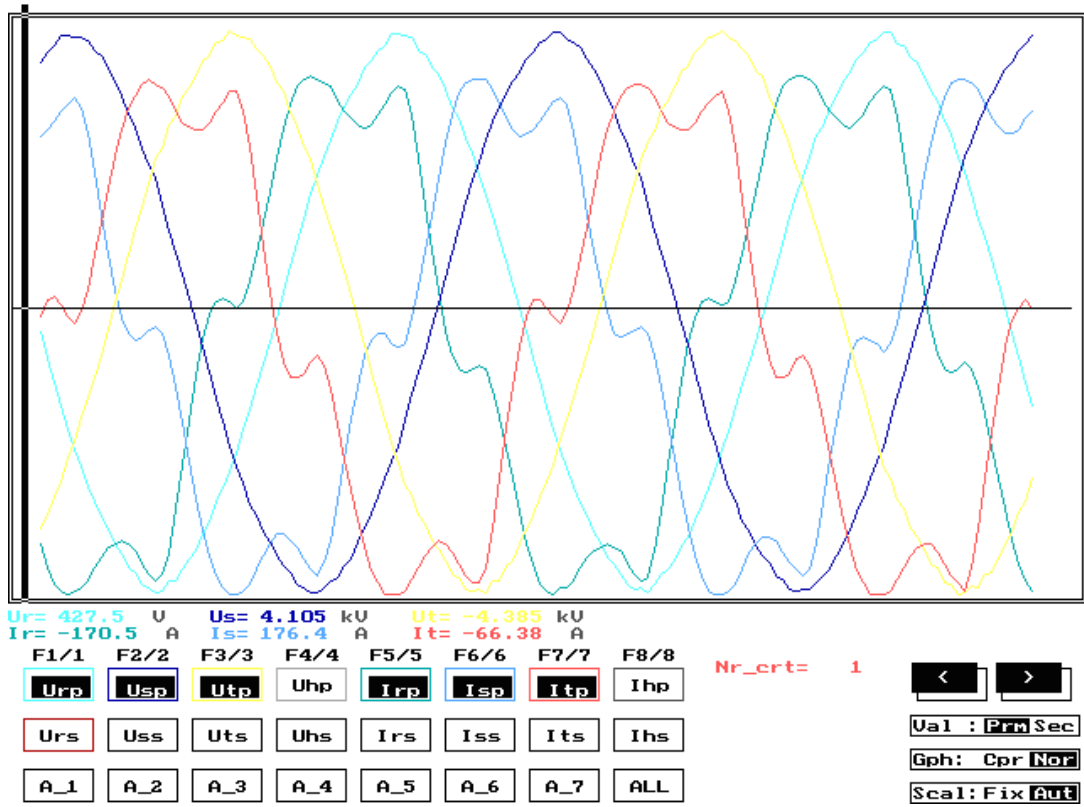


Fig.A1.3.g) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.15

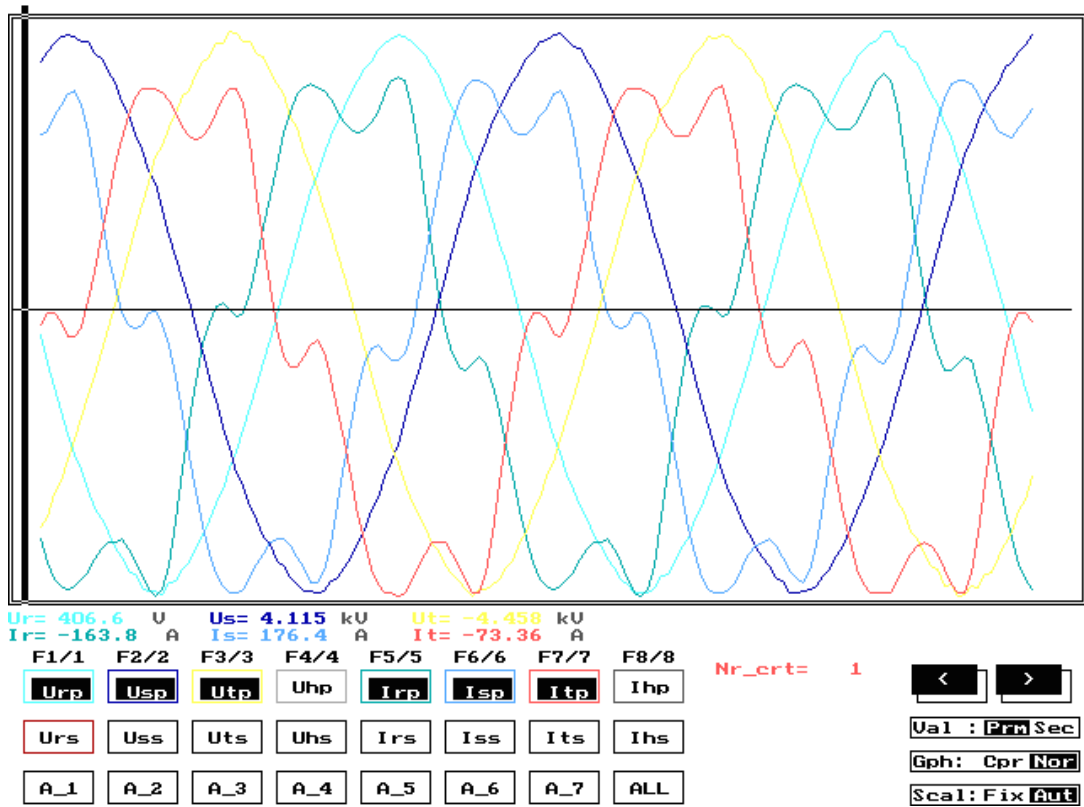


Fig.A1.3.h) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.20

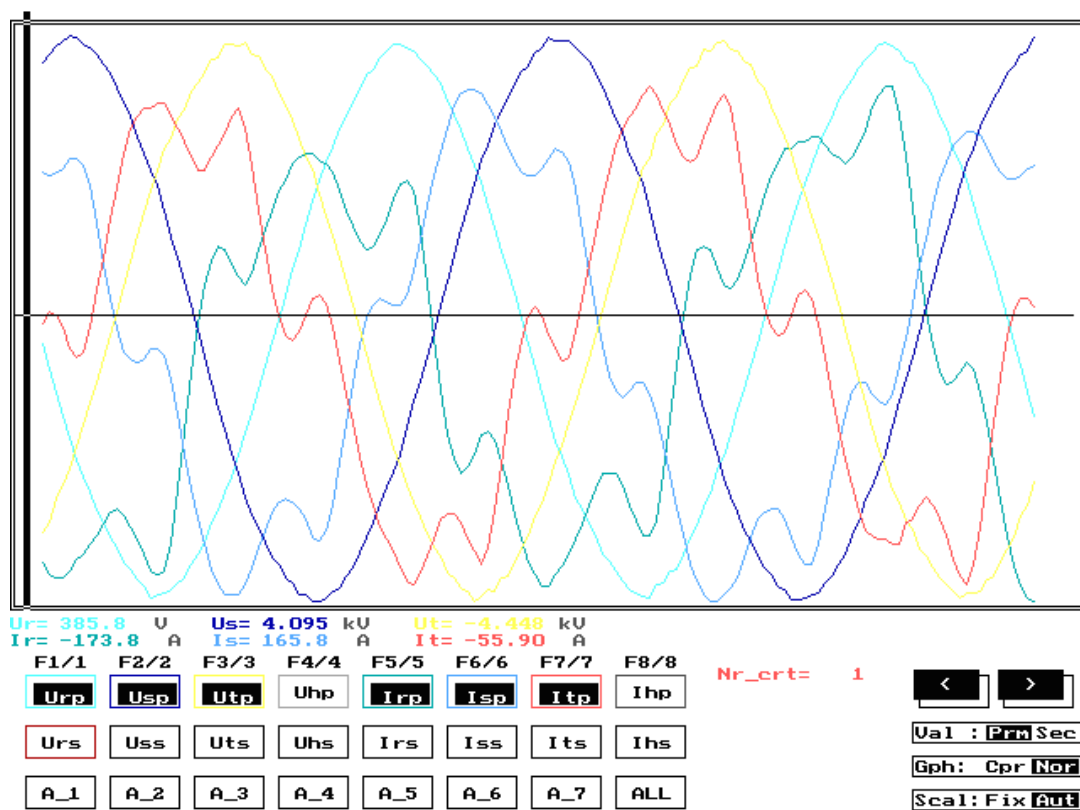


Fig.A1.3.i) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.25

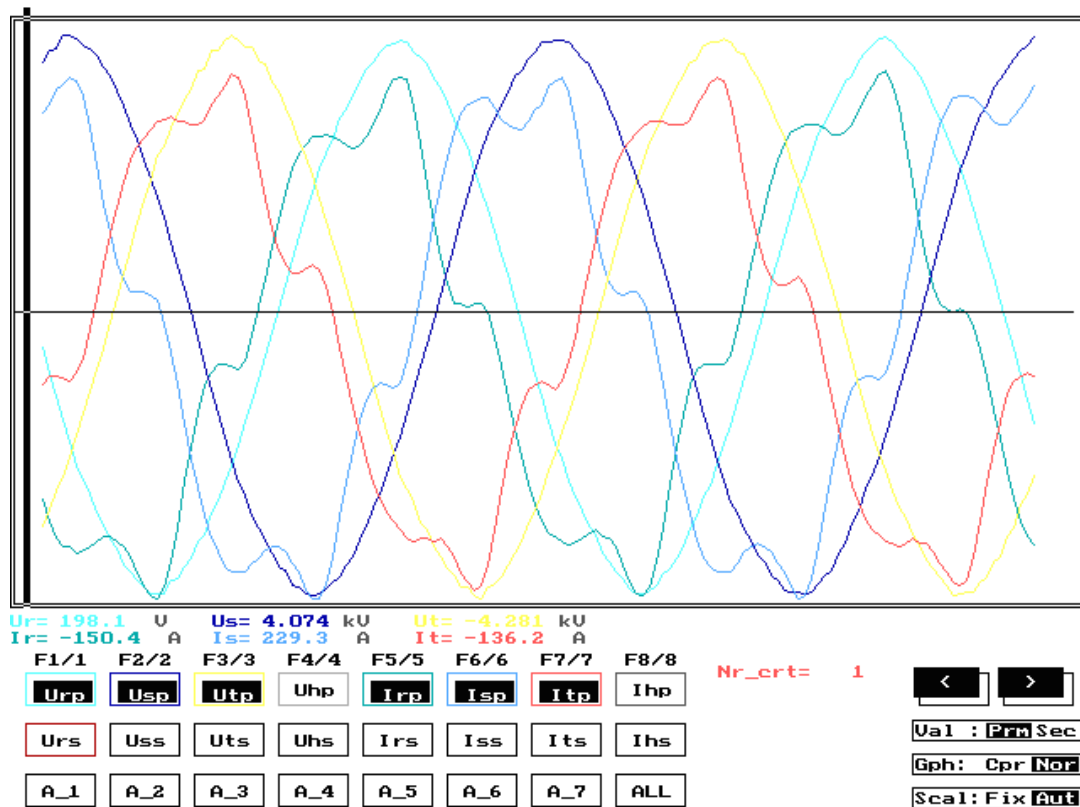


Fig.A1.3.j) Măsurători Reșița – 3 septembrie 2004 ora 16.30

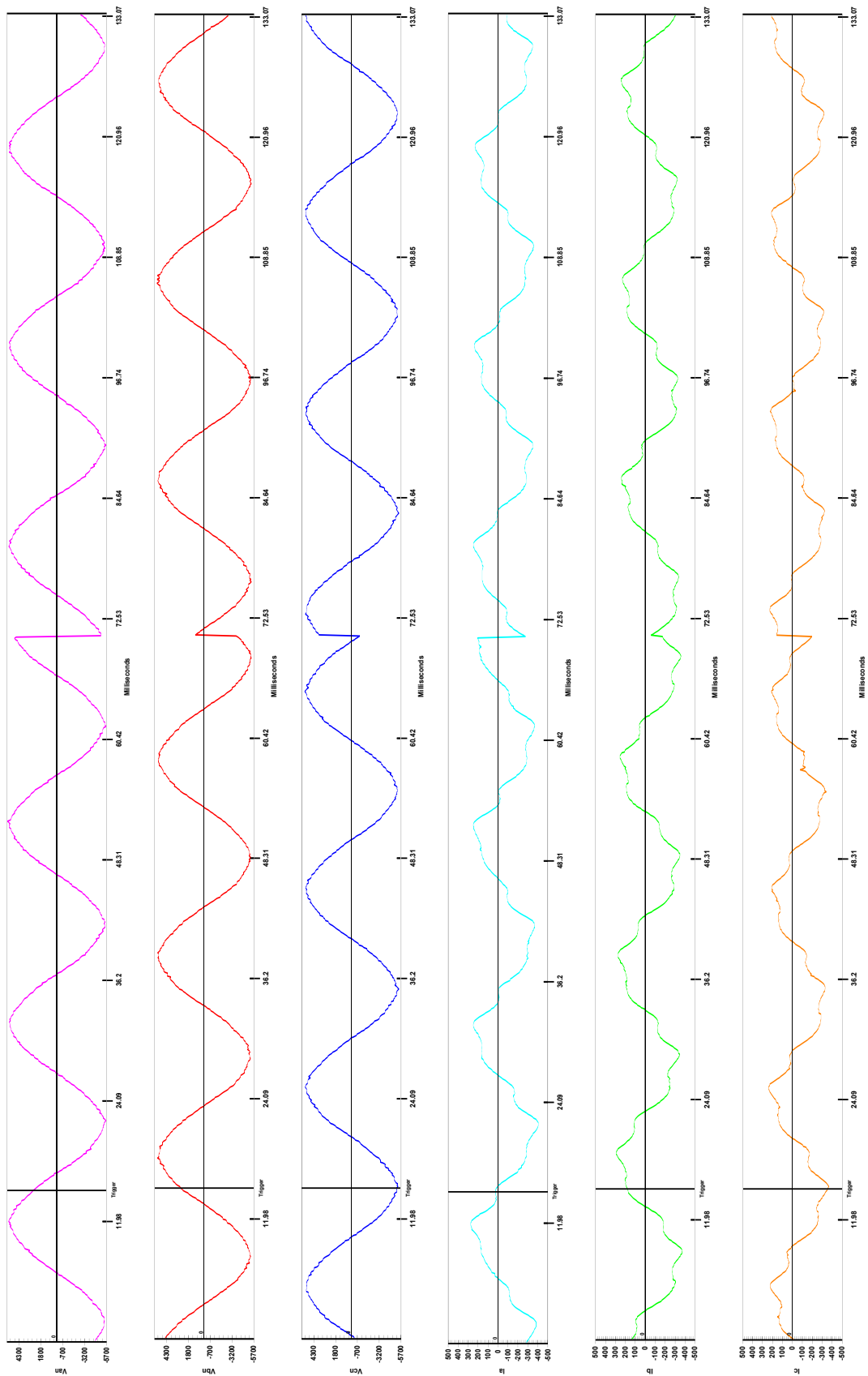


Fig.A1.4. Oscilograma 1 a tensiunilor și curenților pe barele de 6 kV – Stația Bârzava.

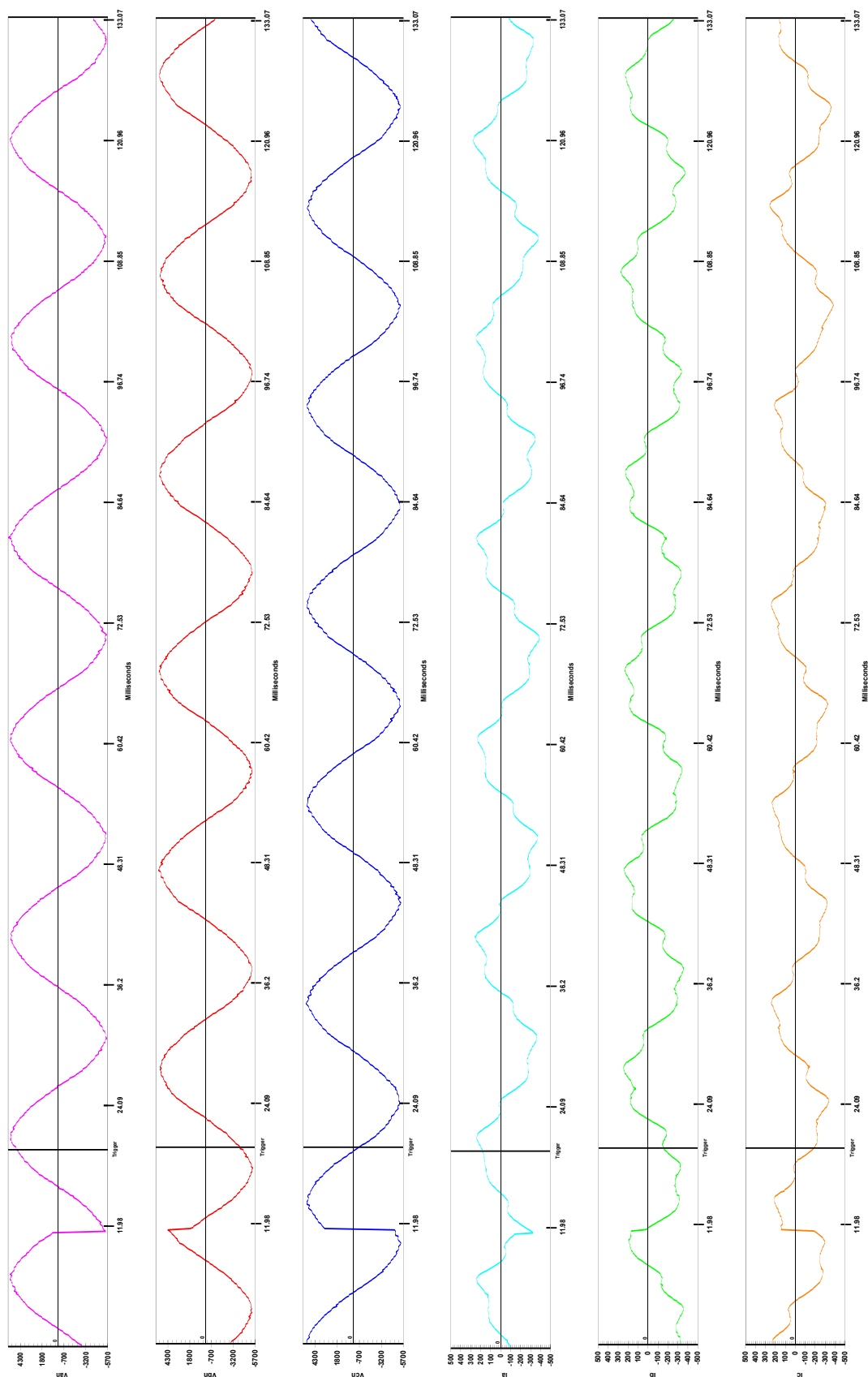


Fig.A1.5. Oscilograma 2 a tensiunilor și curenților pe barele de 6 kV – Stația Bârzava.

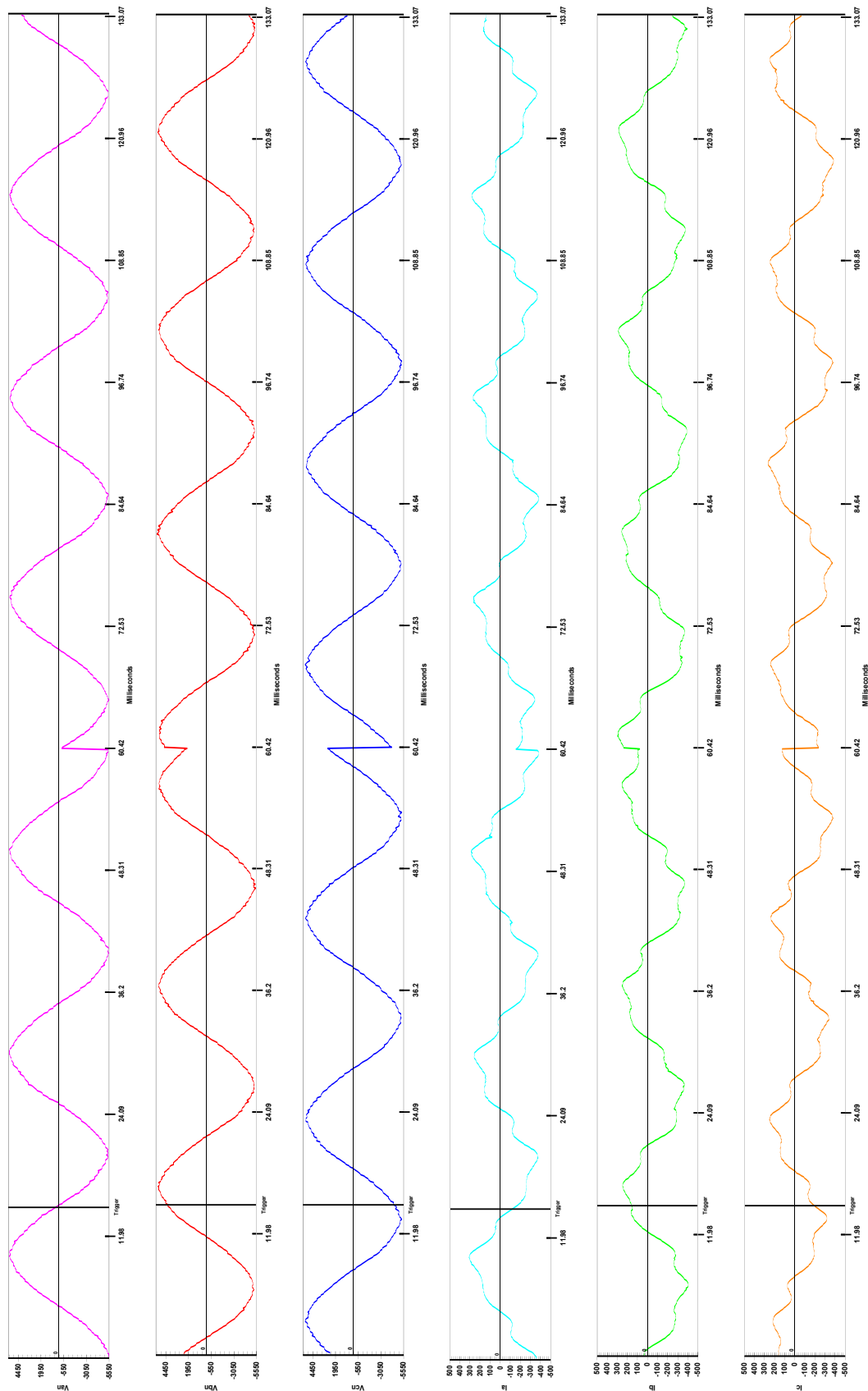


Fig.A1.6. Oscilograma 3 a tensiunilor și curenților pe barele de 6 kV – Stația Bârzava.

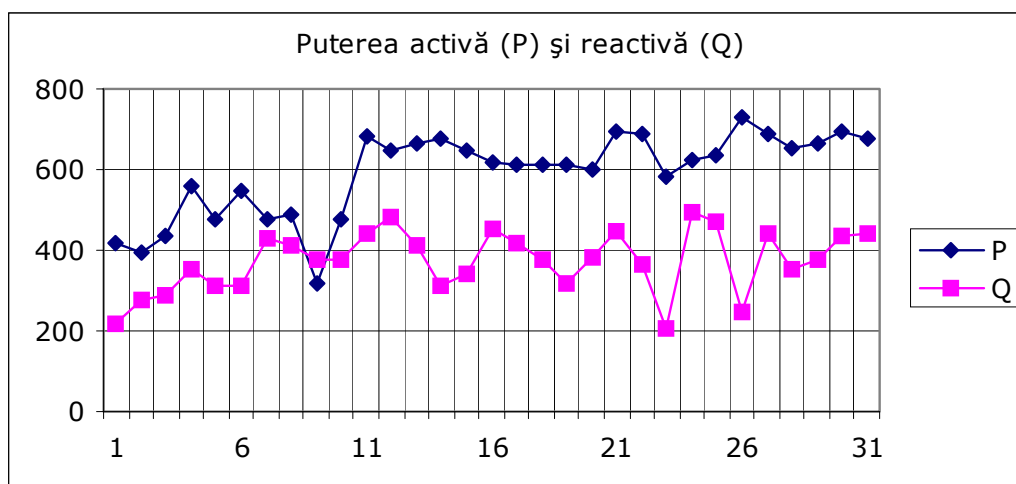


Fig.A1.7. Putere activă (P) și reactivă (Q).

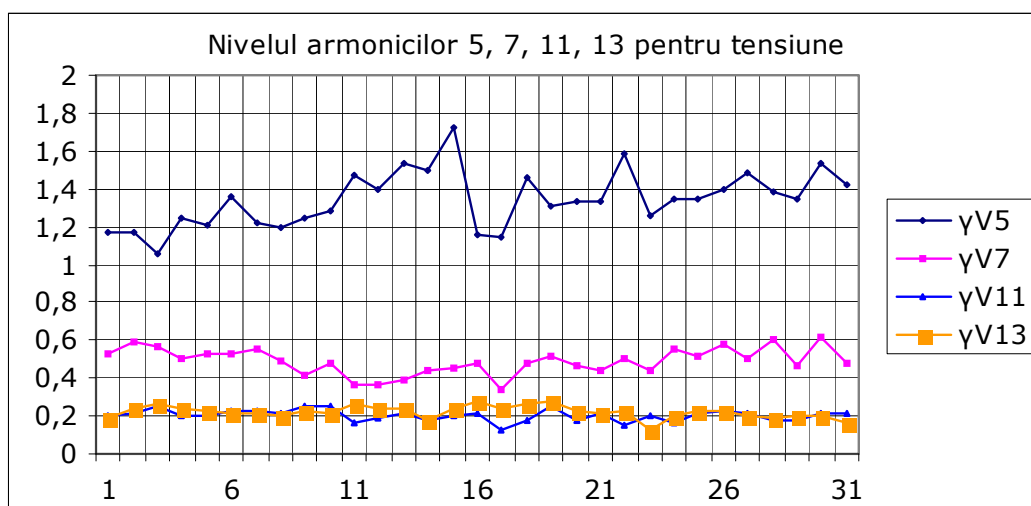


Fig.A1.8. Nivelul armonicilor 5, 7, 11, 13 pentru tensiune.

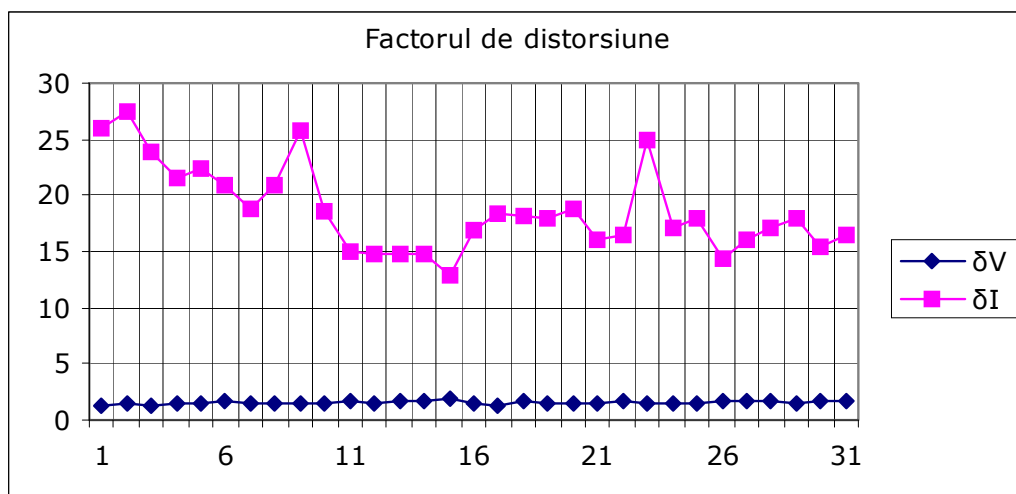


Fig.A1.9. Factor de distorsiune.

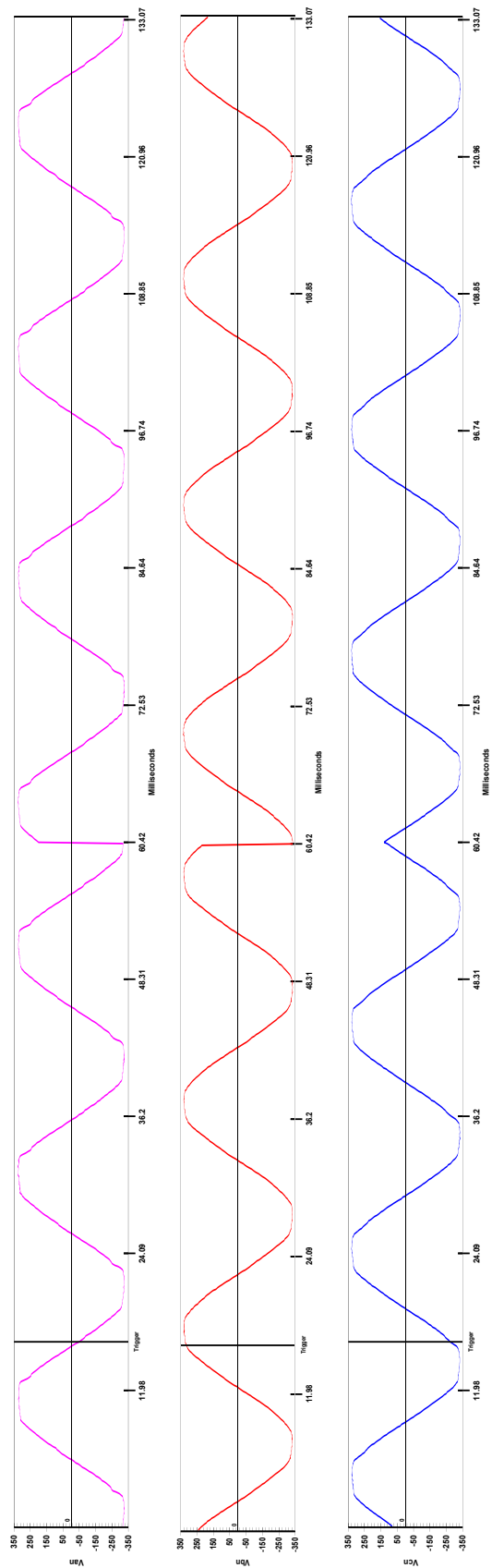


Fig.A1.10. Oscilogrammele tensiunilor de fază în rețeaua de 0,4 kV.

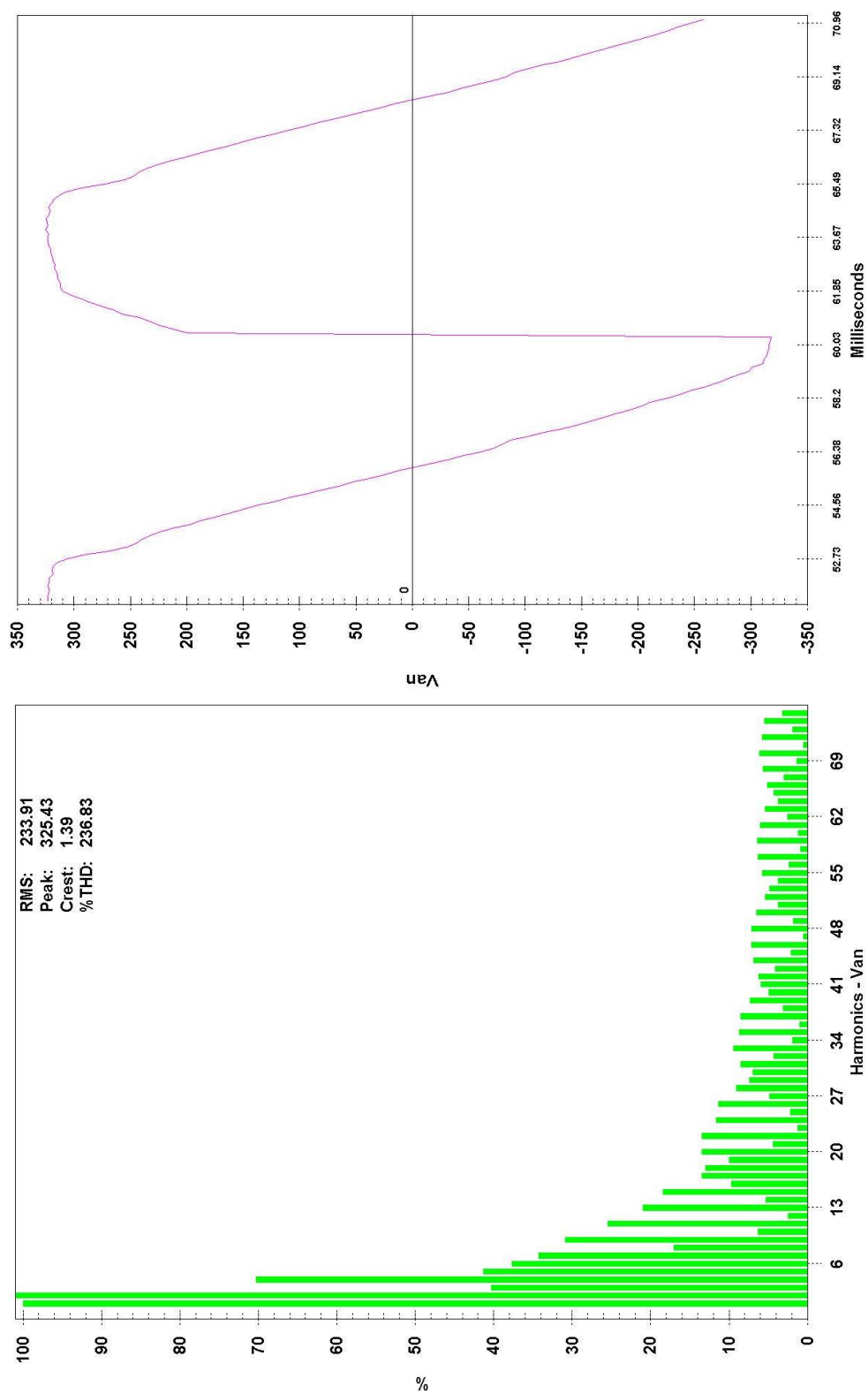


Fig.A1.11. Oscilograma tensiunii și spectrul armonicilor pe durata perturbației

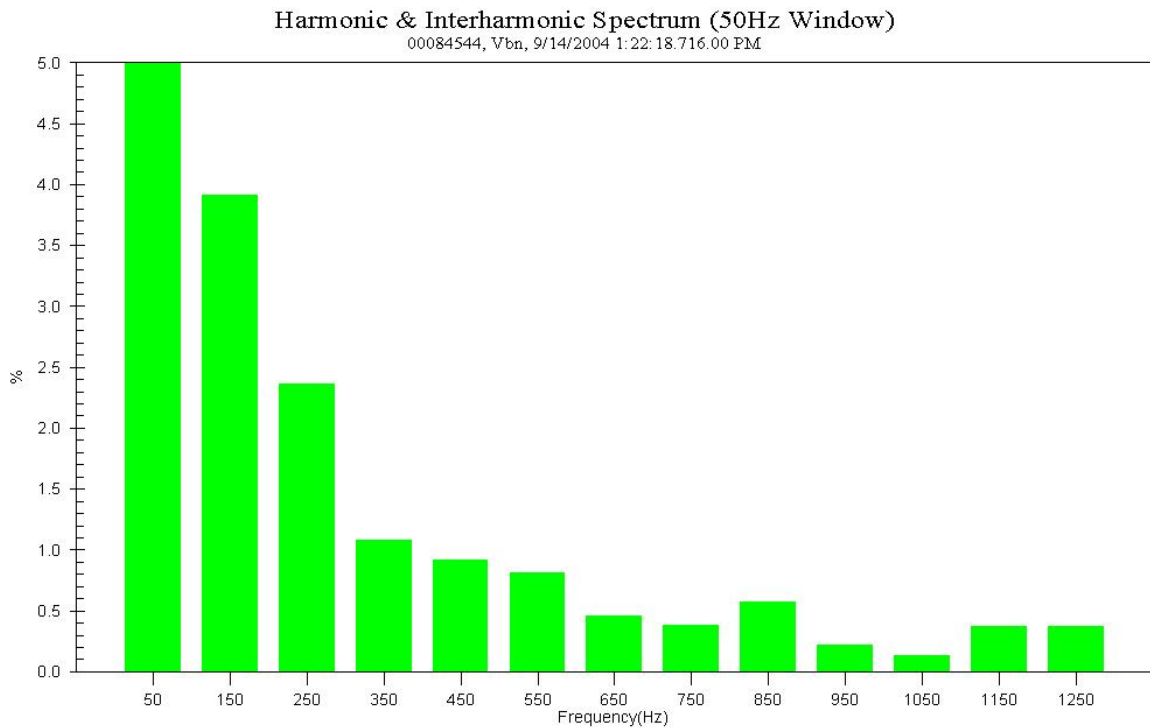


Fig.A1.12.a) Spectrul armonicilor tensiunilor fazei b – 0,4 kV.

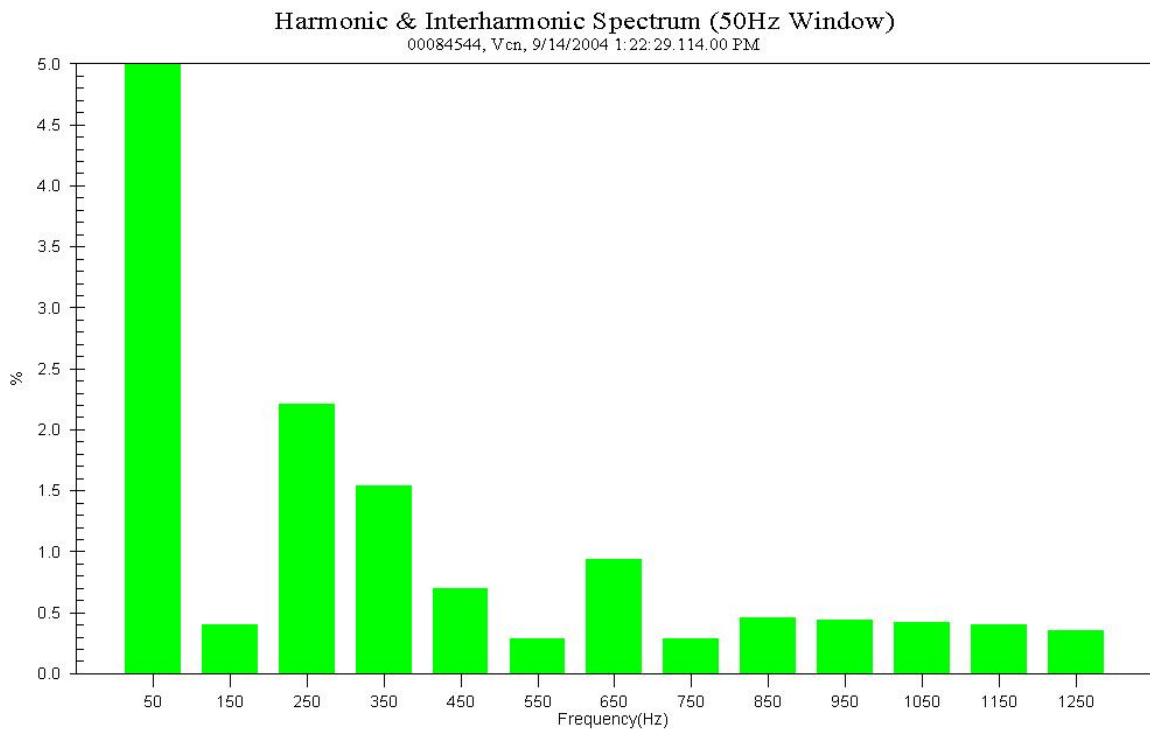


Fig.A1.12.b) Spectrul armonicilor tensiunilor fazei c – 0,4 kV

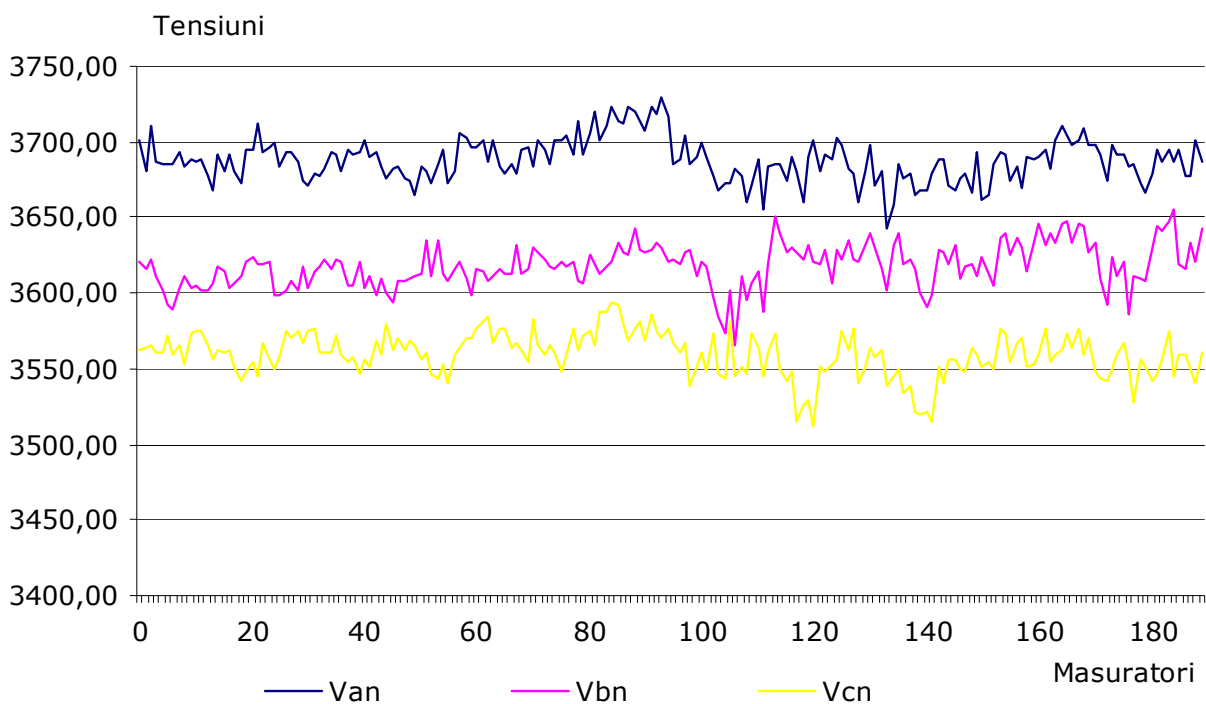


Fig.A1.13. Variația valorilor efective ale tensiunilor pe cele 3 faze de pe barele de 6 kV (2.09.2004 orele 18.00 – 20.00).

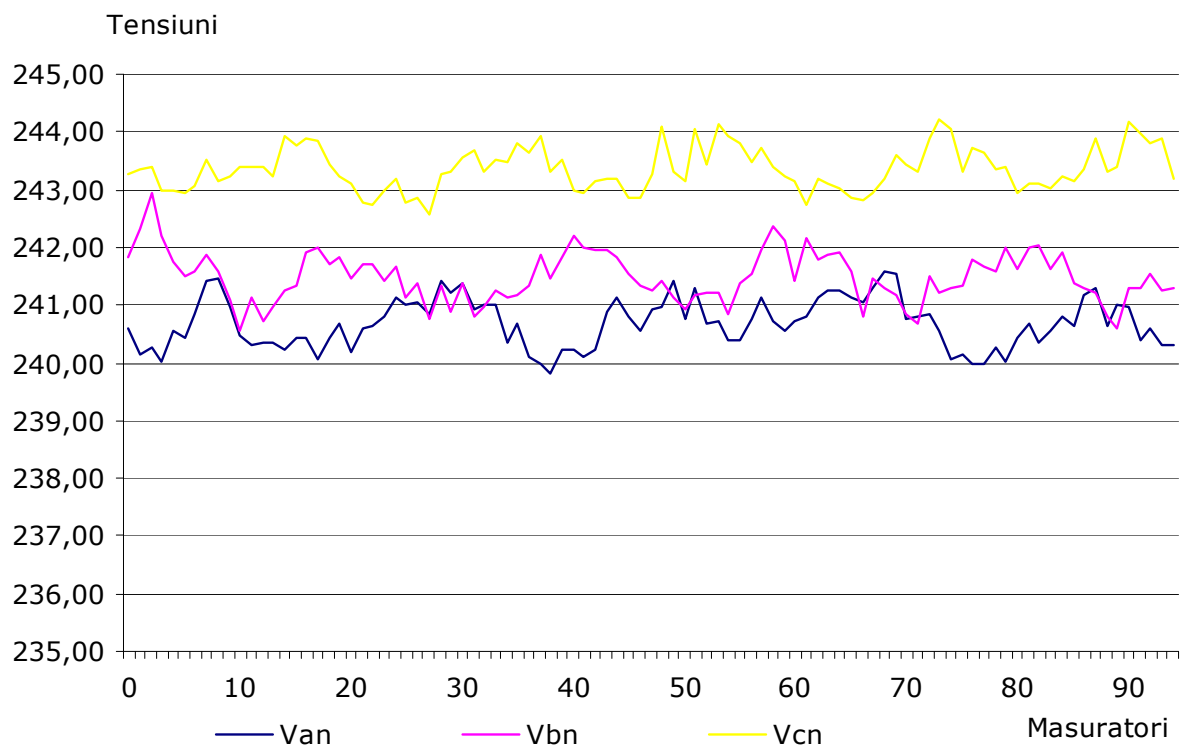


Fig.A1.14. Variația valorilor efective ale tensiunilor pe cele 3 faze de pe barele de 0,4 kV (14.09.2004 orele 16.00 – 18.00).

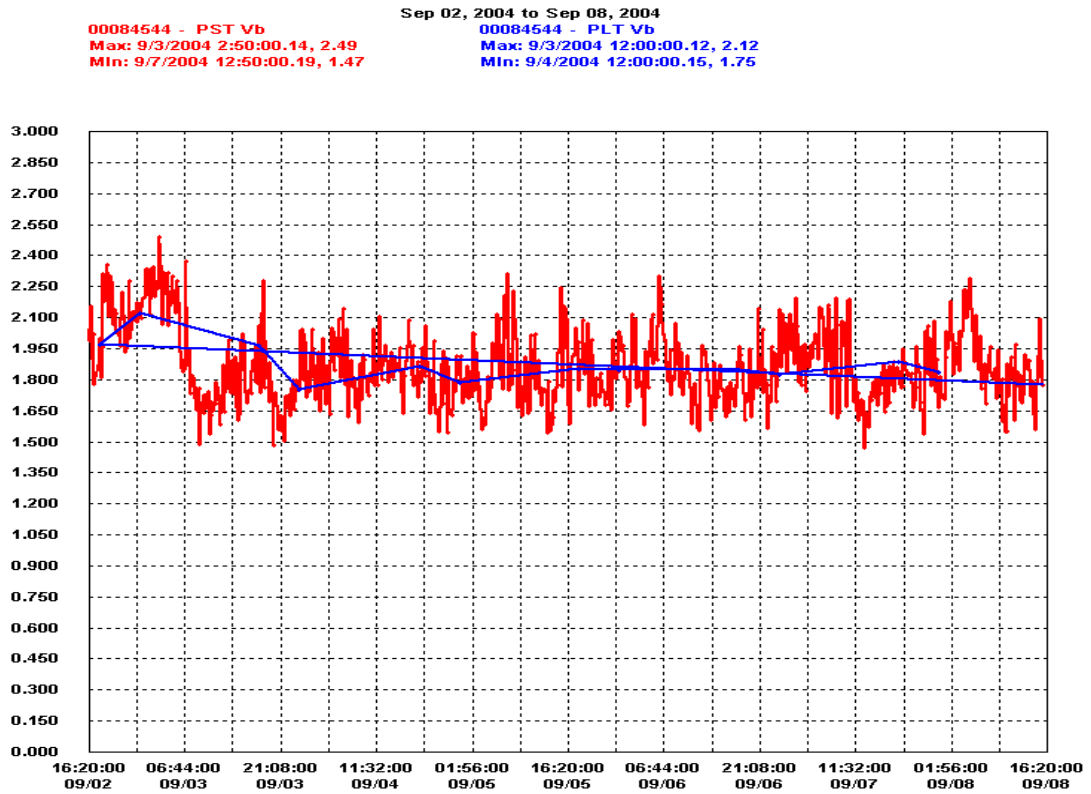


Fig.A1.15.a. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza b, V_b nivel 6kV.

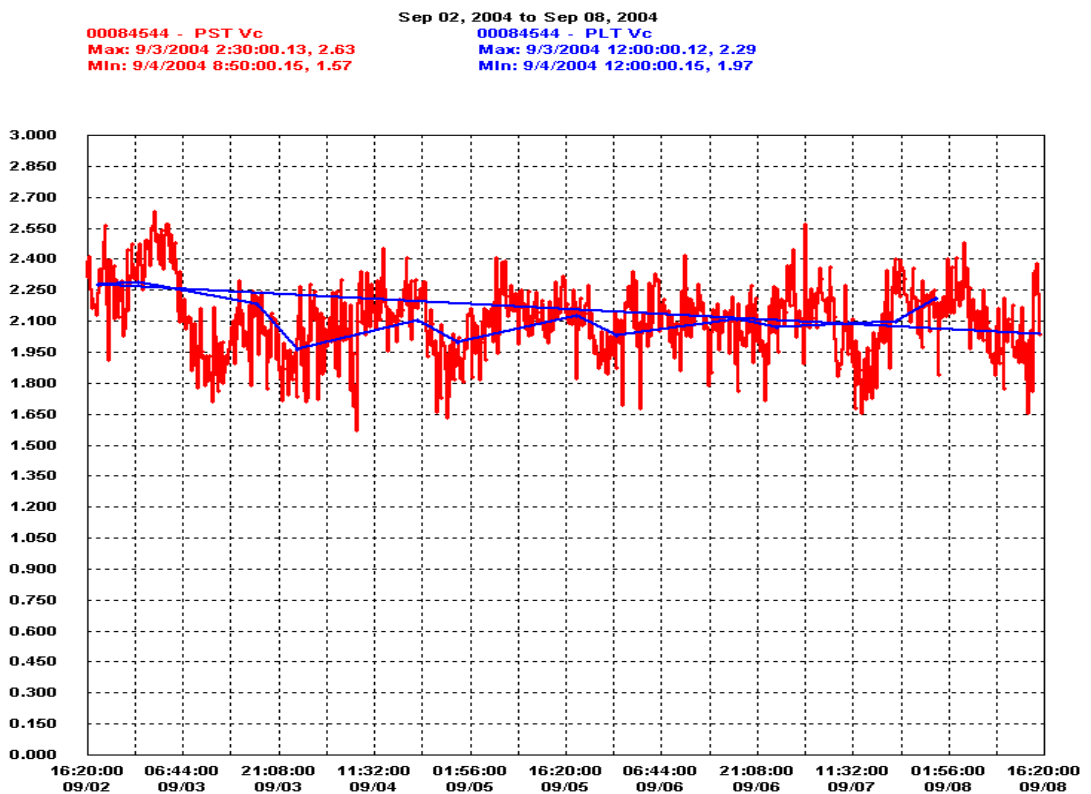
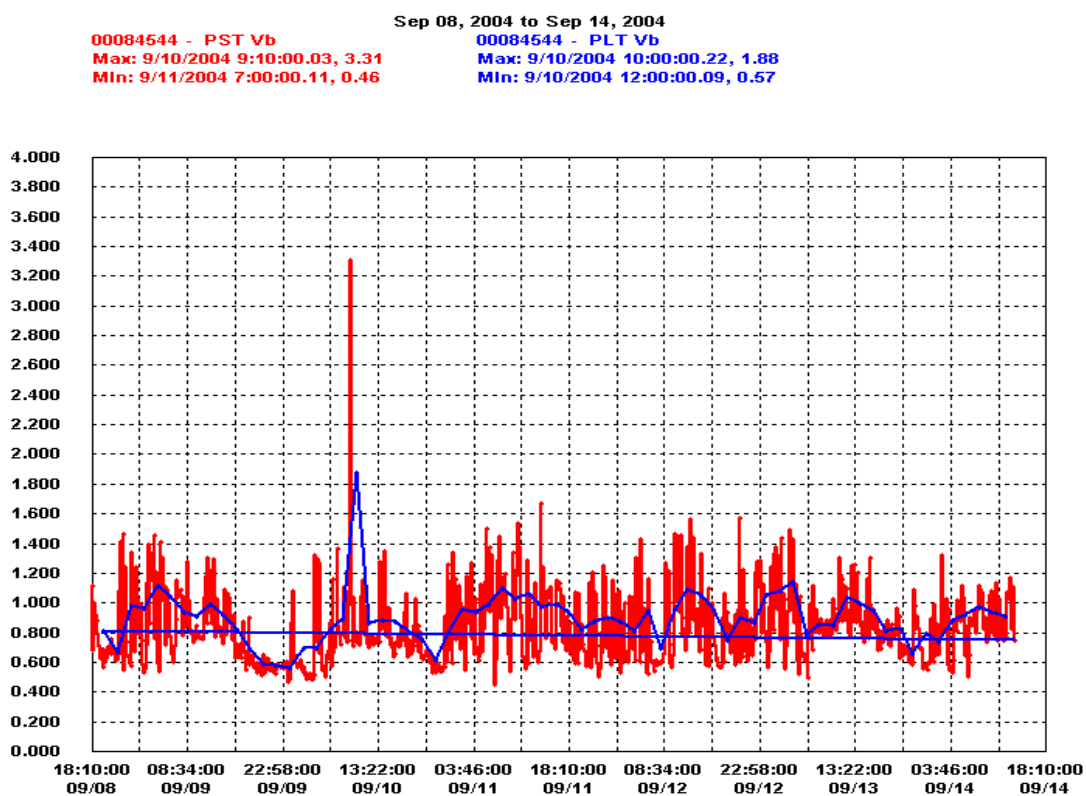
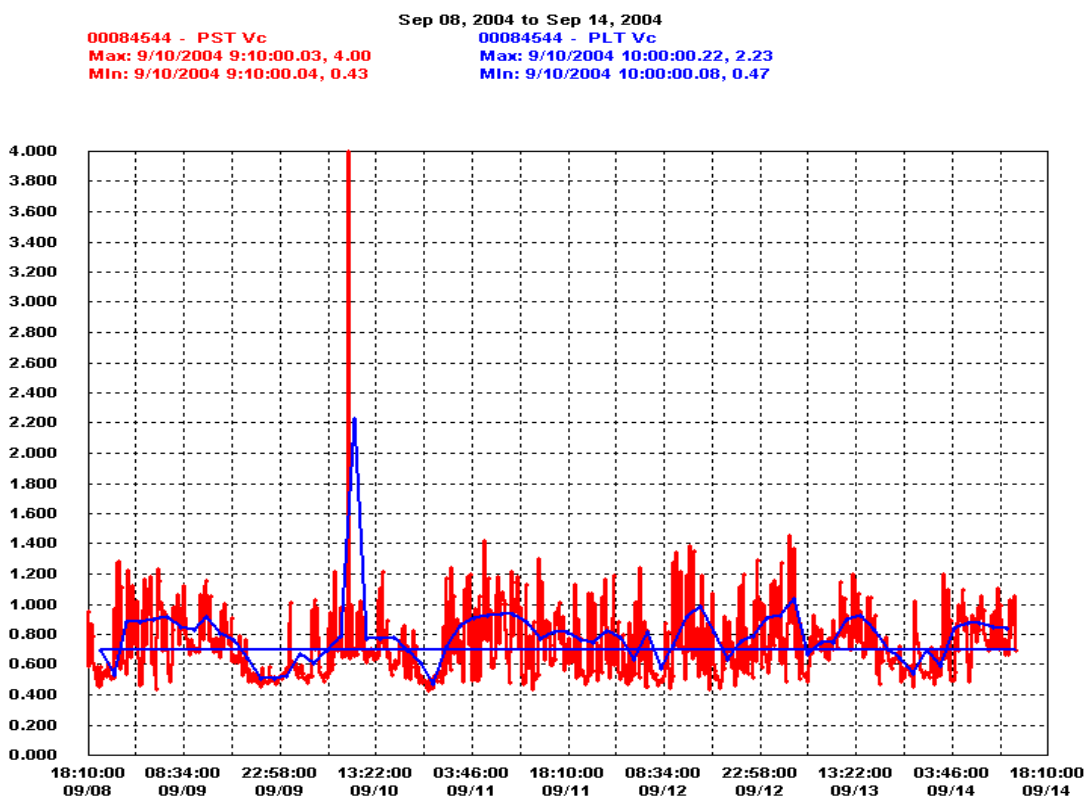


Fig.A1.15.b. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza c, V_c nivel 6kV.

Fig.A1.16.a. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza b, V_b nivel 0,4kV.Fig.A1.16.b. Variația indicatorilor de severitate la flicker (P_{st} , P_{lt}) pentru faza c, V_c nivel 0,4kV.

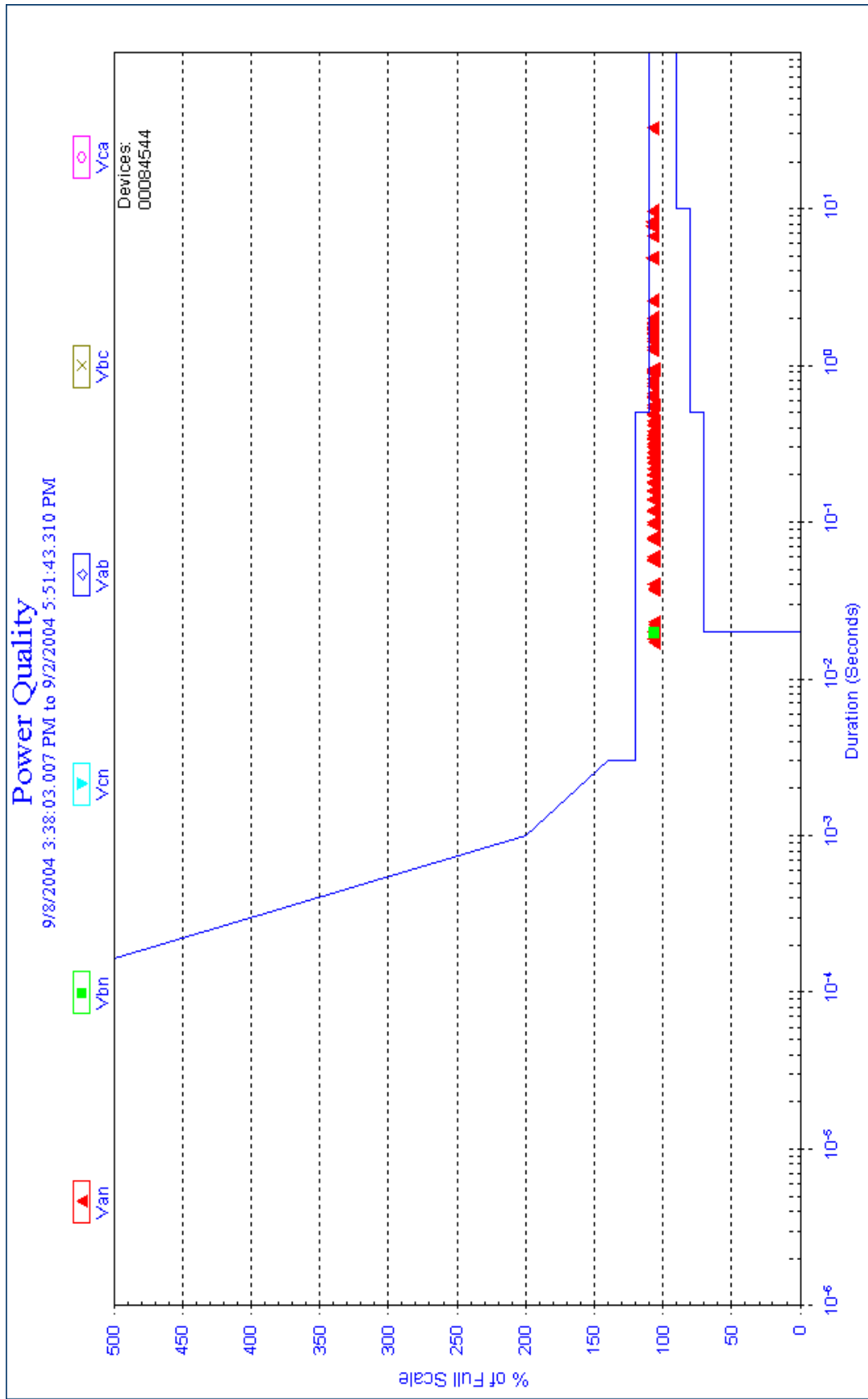


Fig.A1.17. Curba de acceptabilitate (ITIC) pentru tensiunile de fază, la nivelul de 6 kV.

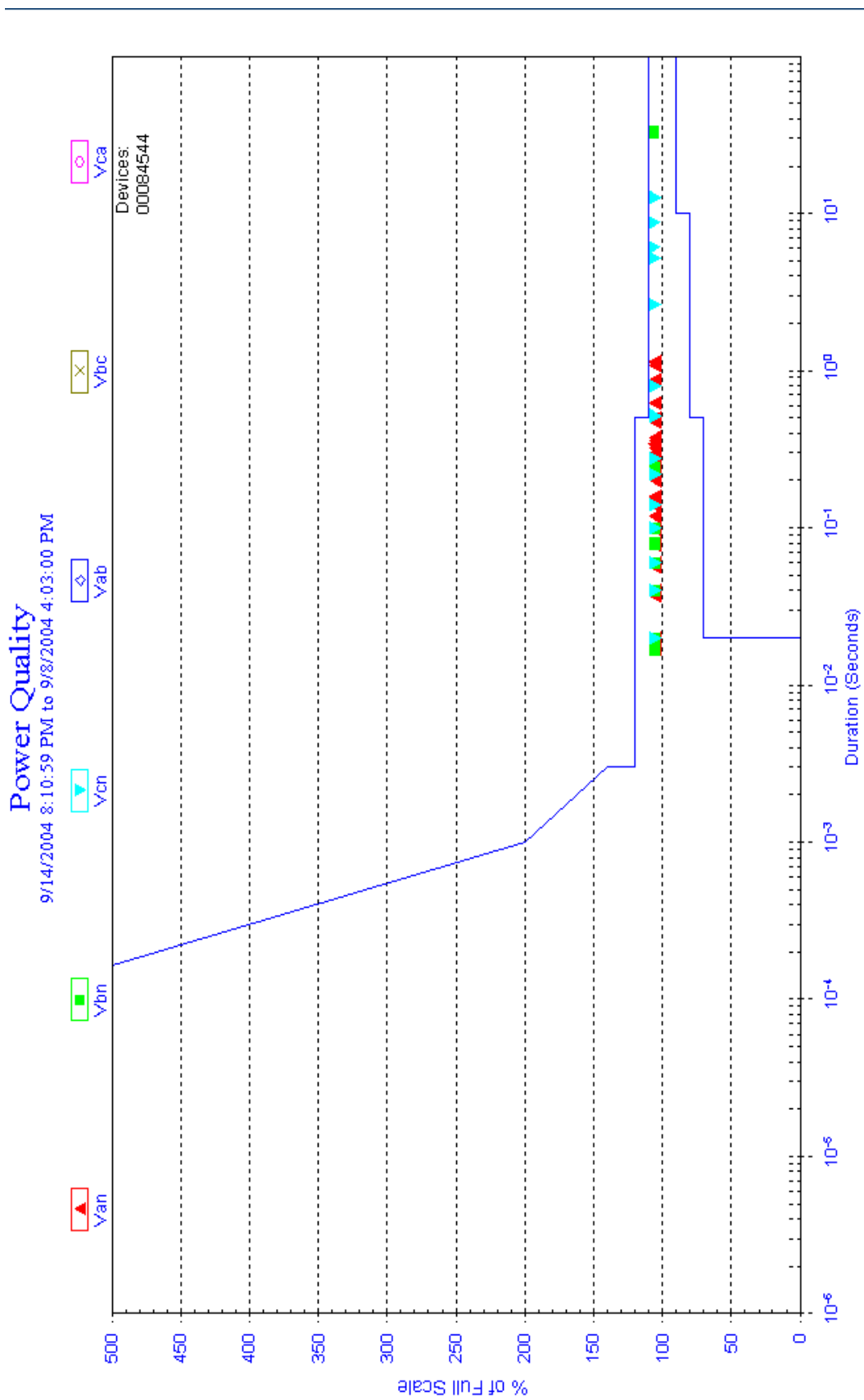


Fig.A1.18. Curba de acceptabilitate (ITIC) pentru tensiunile de fază, la nivelul de 0,4 kV.

ANEXA 2 – DETERMINAREA GOLURILOR DE TENSIUNE PENTRU DIFERITE SITUAȚII.

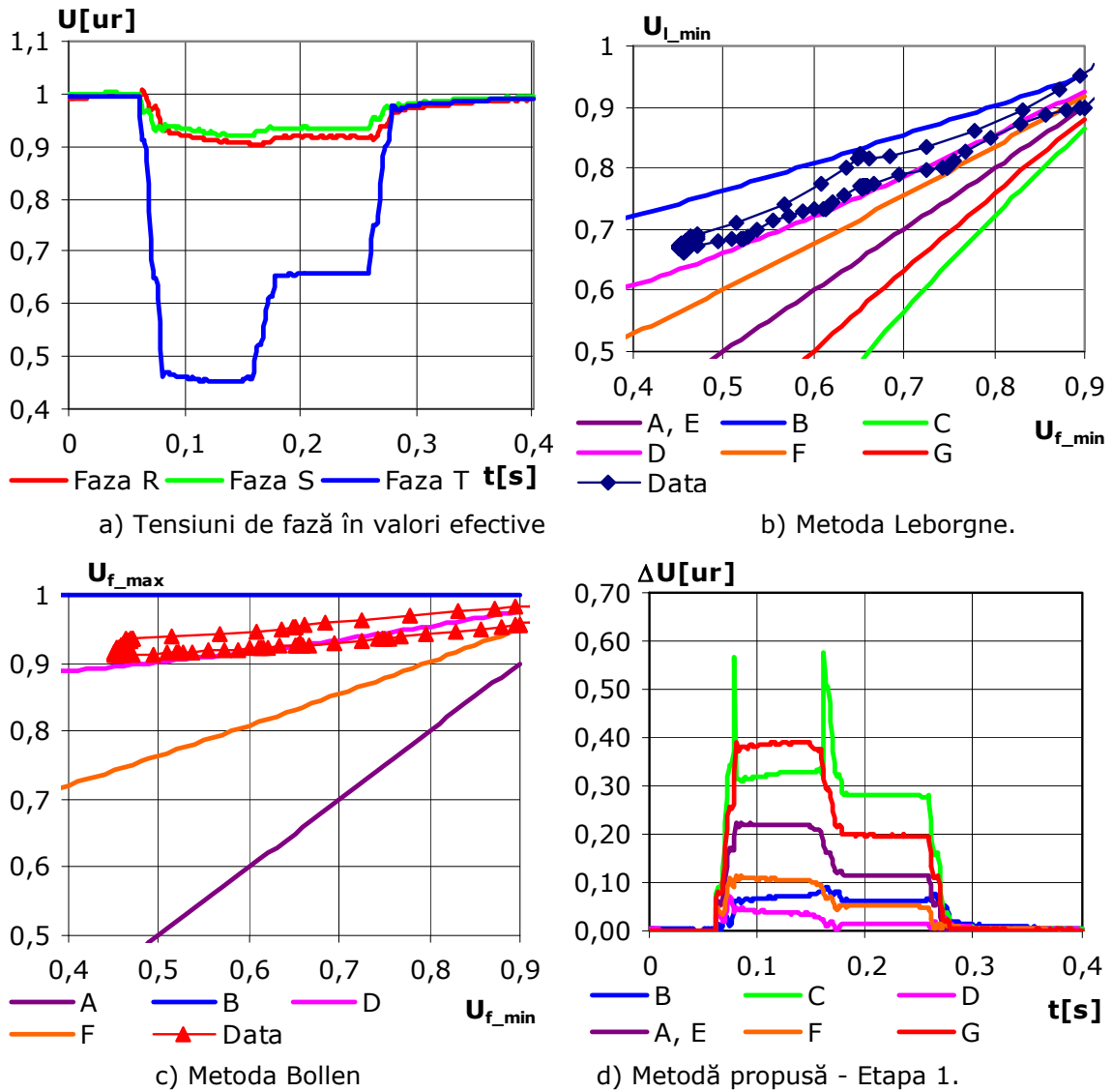
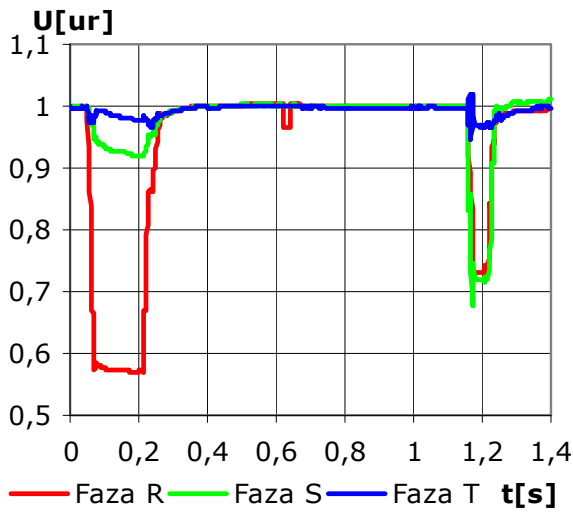
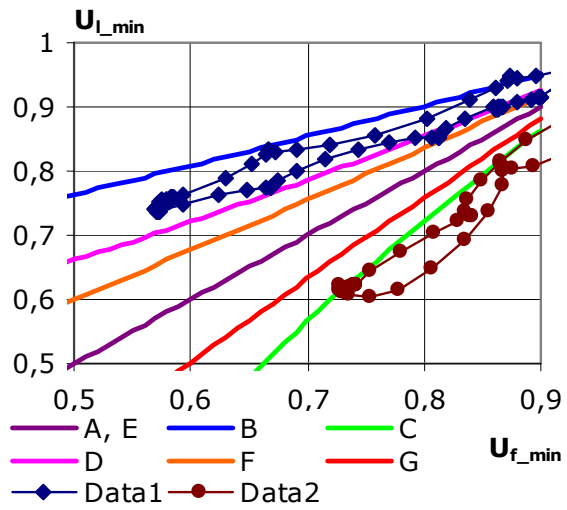


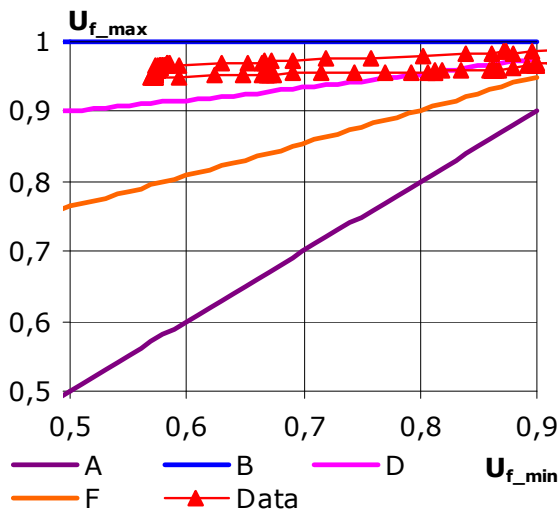
Fig.A2.1. Determinarea tip gol de tensiune Săcălaz – caz 1.



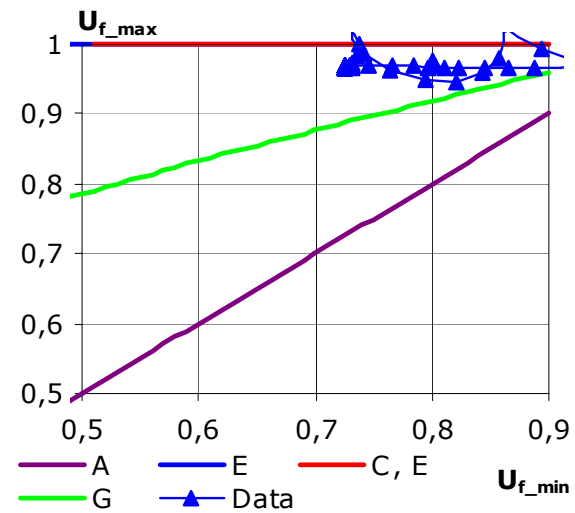
a) Tensiuni de fază în valori efective



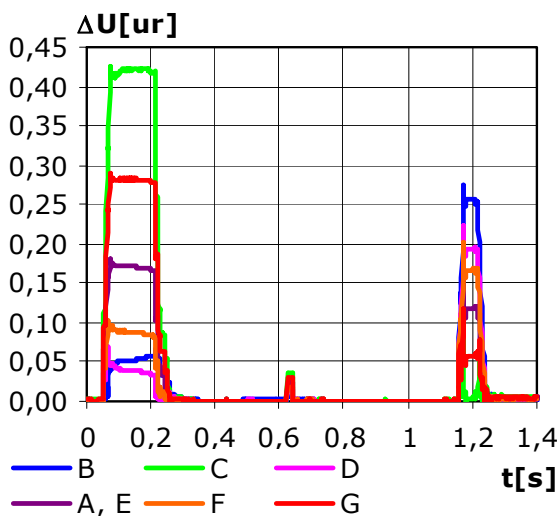
b) Metoda Leborgne.



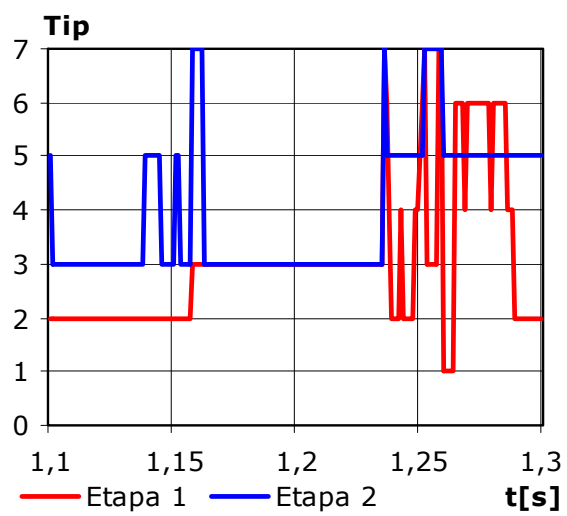
c) Metodă Bollen – primul gol de tensiune.



d) Metodă Bollen – al doilea gol de tensiune.

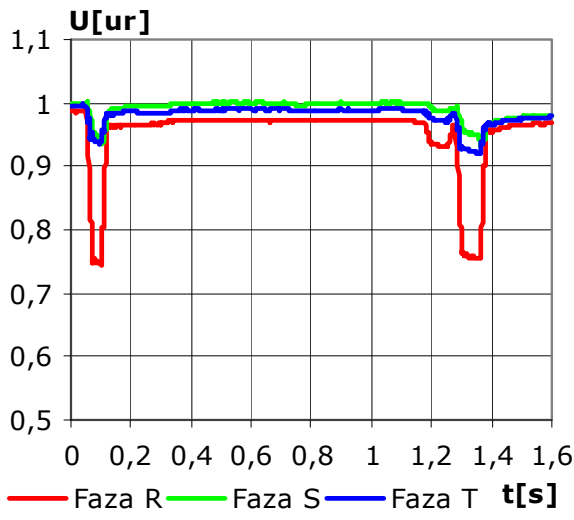


e) Metodă propusă - Etapa 1

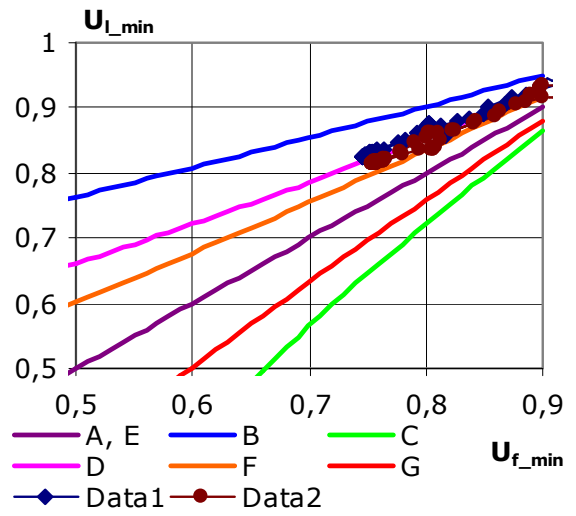


f) Metodă propusă - Etapa 2.

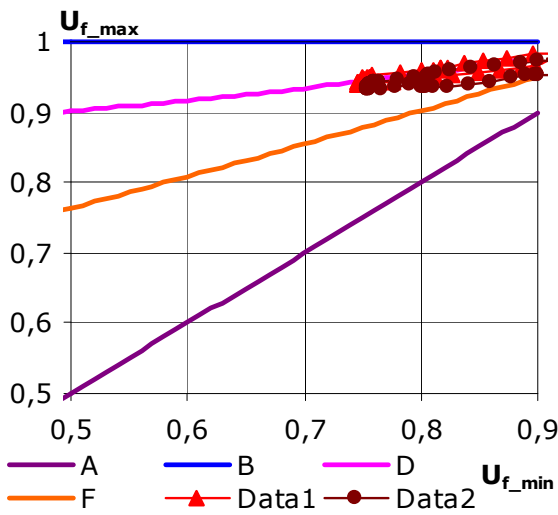
Fig.A2.2. Determinarea tip gol de tensiune Săcălaz – caz 2.



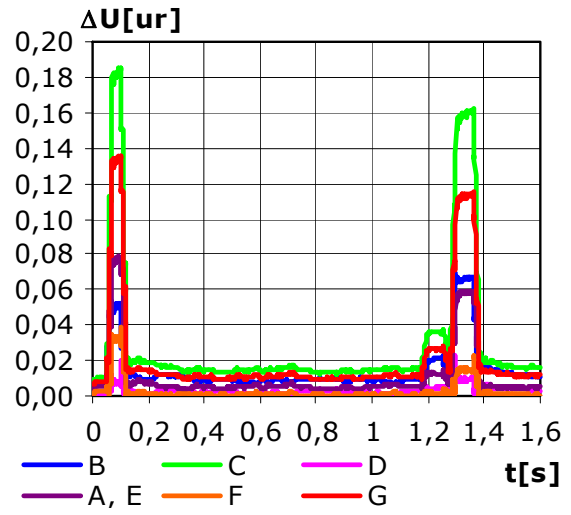
a) Tensiuni de fază în valori efective



b) Metoda Leborgne.

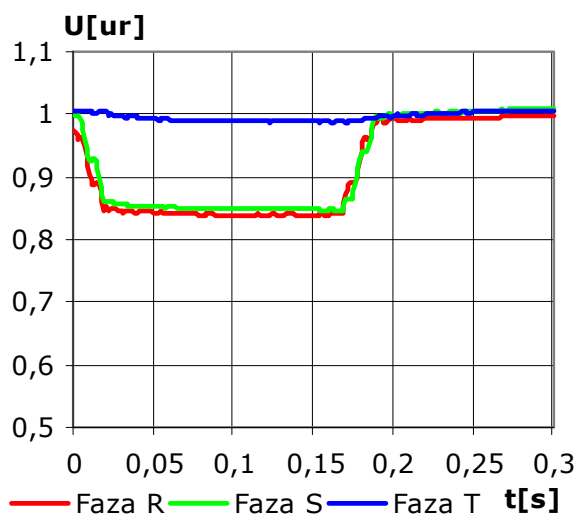


c) Metoda Bollen

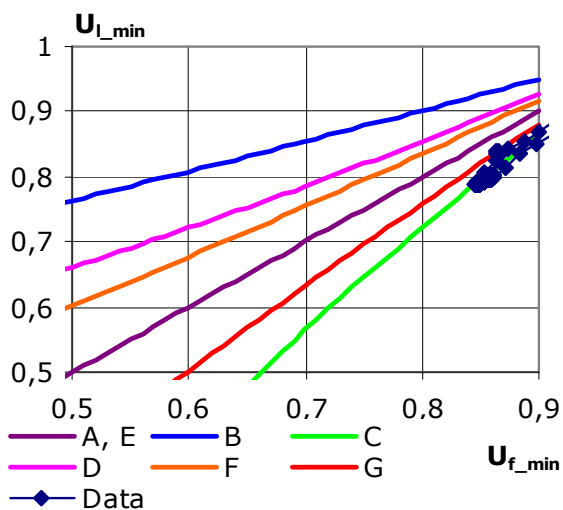


d) Metodă propusă - Etapa 1.

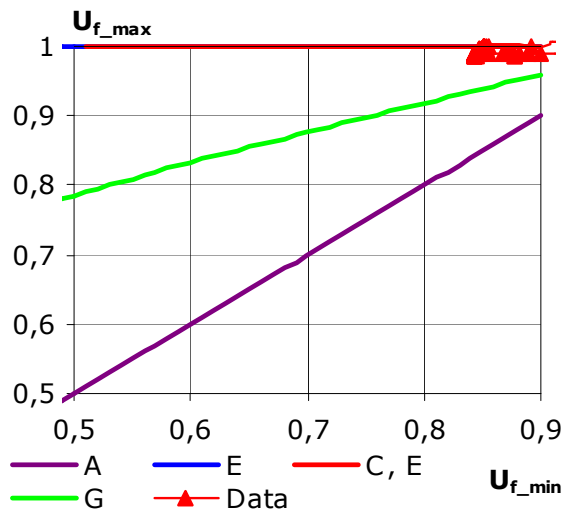
Fig.A2.3. Determinarea tip gol de tensiune Săcălaz - caz 3.



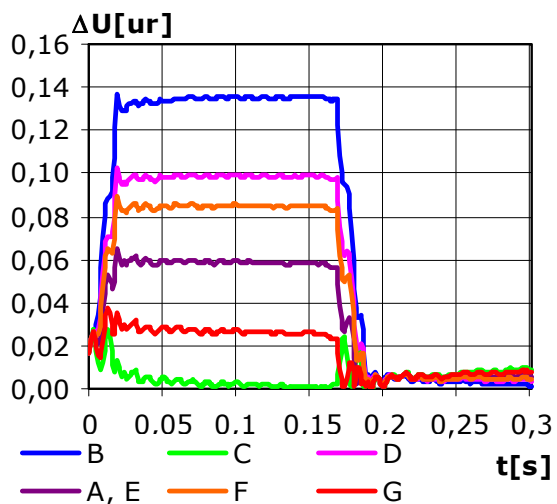
a) Tensiuni de fază în valori efective.



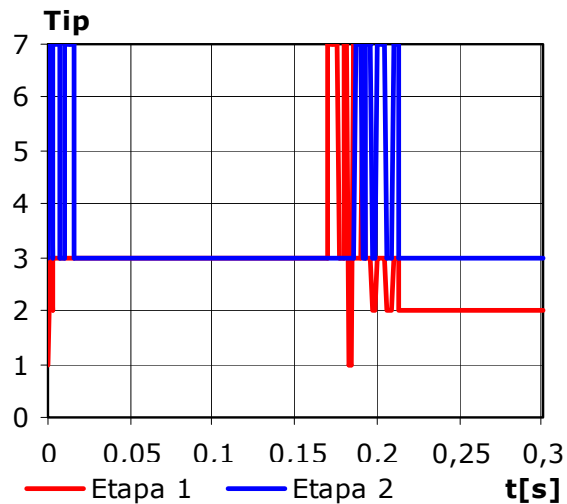
b) Metoda Leborgne



c) Metodă Bollen.

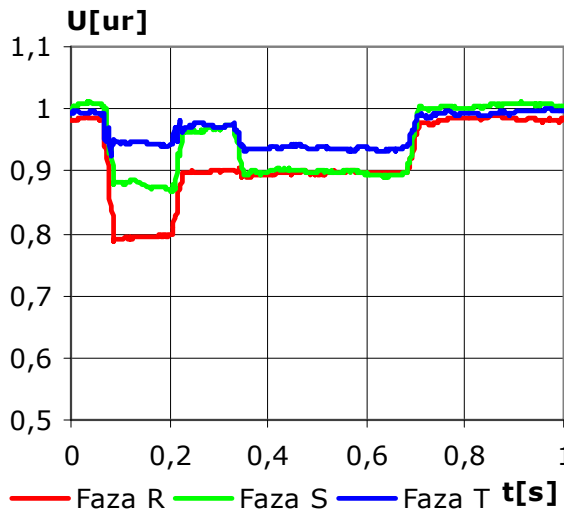


d) Metodă propusă - Etapa 1

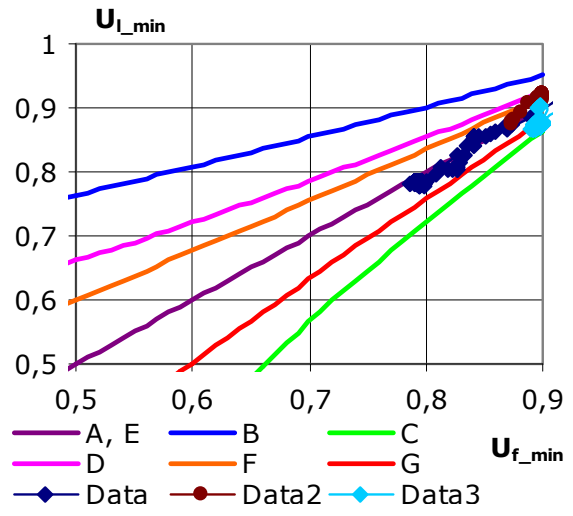


e) Metodă propusă - Etapa 2.

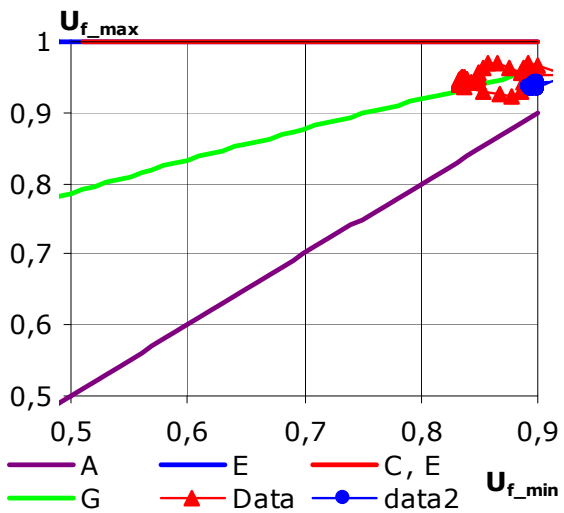
Fig.A2.4. Determinarea tip gol de tensiune Săcălaz - caz 4.



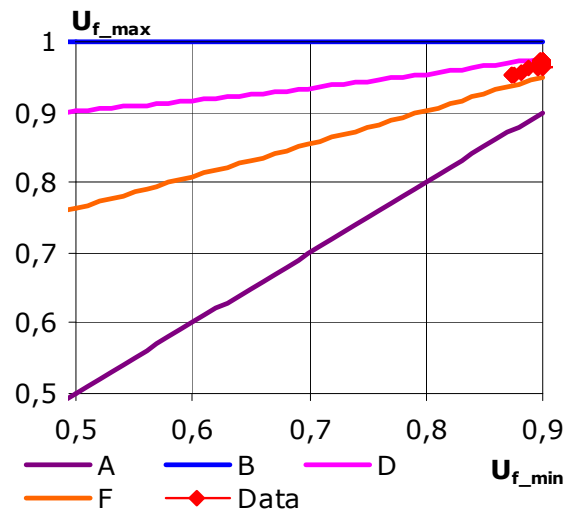
a) Tensiuni de fază în valori efective



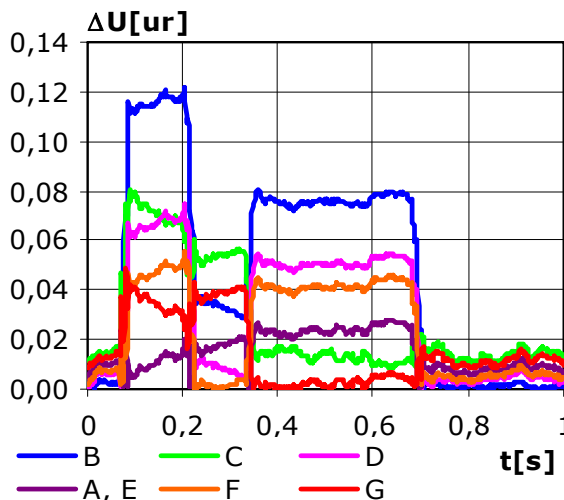
b) Metoda Leborgne.



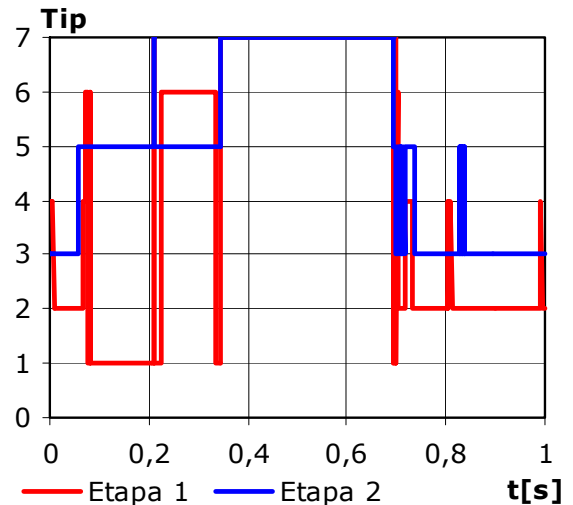
c) Metodă Bollen – primul și al treilea.



d) Metodă Bollen – al doilea gol de tensiune.

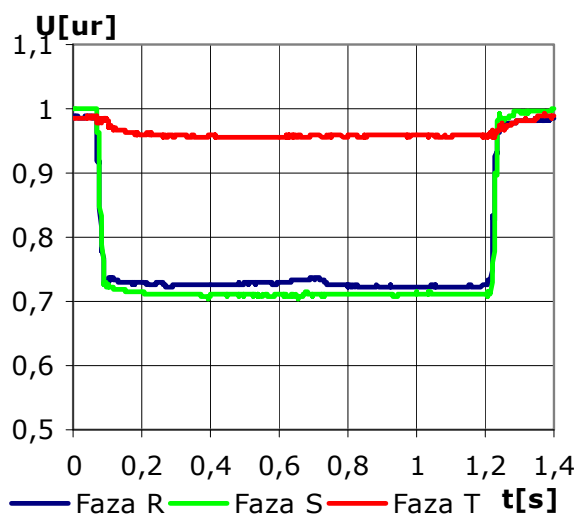


d) Metodă propusă - Etapa 1

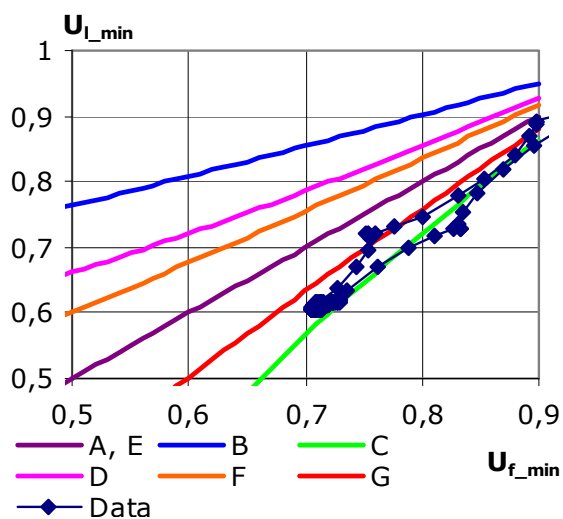


e) Metodă propusă - Etapa 2.

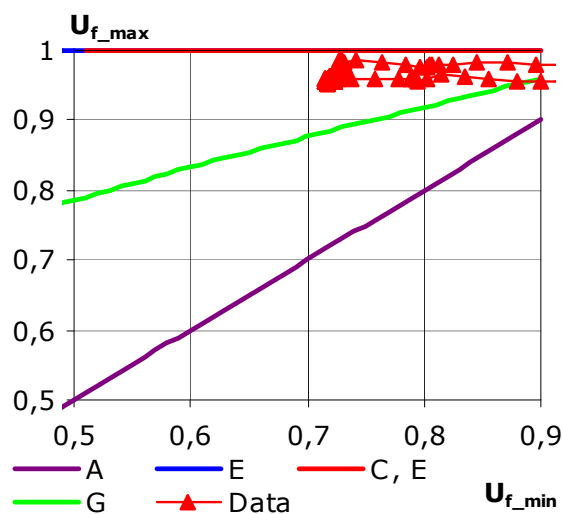
Fig.A2.5. Determinarea tip gol de tensiune Mociur – caz 3.



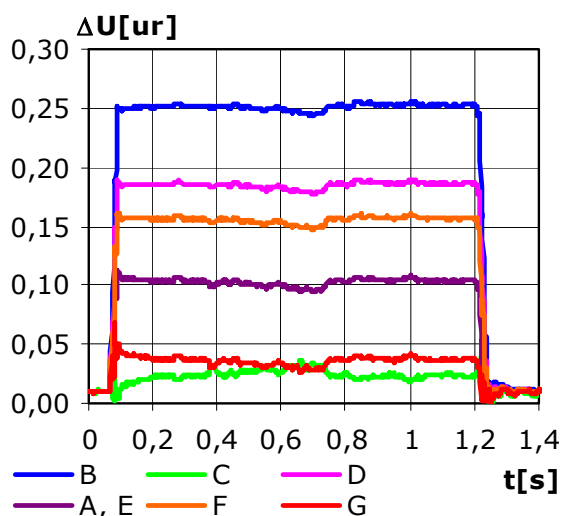
a) Tensiuni de fază în valori efective.



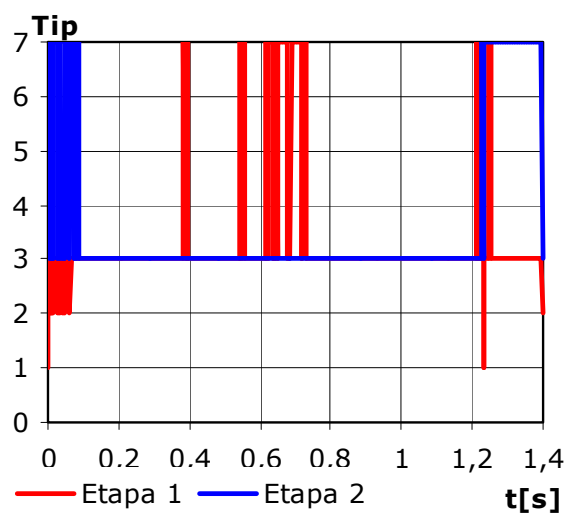
b) Metoda Leborgne



c) Metodă Bollen.



d) Metodă propusă - Etapa 1



e) Metodă propusă - Etapa 2.

Fig.A2.6. Determinarea tip gol de tensiune Mociur – caz 4.

ANEXA 3 – DETERMINAREA TIPULUI GOLURILOR DE TENSIUNE CU METODELE PREZENTATE.

Loc	Data	Ora	Tip Metodă proprie	DU [u.r.]	Fază afect	Dt [ms]	Tip metodă componente	Tip metodă 6 faze	Tip metodă Leborgne	Tip metodă Bollen
Arad01	2005-07-09	3:55:40 AM	D	0.68	R	158	Da	Da	D	D
Arad01	2005-07-17	4:18:33 AM	B	0.39	T	127	Dc	Dc	D	B
Arad01	2005-08-01	12:45:35 AM	D	0.70	S	80	Db	Db	D	B
Arad01	2007-06-07	1:43:21 AM	F	0.80	R	433	Da	Da	F	D
Arad01	2009-04-05	8:03:40 PM	C	0.60	R, T	190	Cb	Cb	C	CsauE
Arad01	2009-04-05	8:03:40 PM	C	0.60	R, T	178	Cb	Cb	C	G
Arad01	2009-05-18	12:43:04 AM	F	0.74	T	101	Dc	Dc	F	D
Arad01	2009-09-30	12:46:27 AM	D	0.36	R	129	Da	Da	D	D
Arad01	2009-10-04	12:46:22 AM	D	0.36	R	129	Da	Da	D	D
Arad01	2009-10-18	7:44:03 AM	D	0.34	R	153	Da	Da	D	D
Bihor01	2003-01-09	7:45:32 PM	F	0.73	T	260	Dc	Dc	AsauE	DsauF
Bihor01	2003-09-14	4:57:49 AM	D	0.23	S	138	Db	Db	D	D
Bihor01	2003-09-18	9:55:37 PM	D	0.45	S	100	Db	Db	D	D
Bihor01	2003-09-18	9:55:37 PM	D	0.59	S	119	Db	Db	D	D
Bihor01	2004-01-06	1:34:09 PM	D	0.46	T	110	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2004-01-06	1:34:09 PM	D	0.52	T	101	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2004-01-06	1:34:09 PM	D	0.71	T	81	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2004-05-18	6:47:31 AM	D	0.52	S	143	Db	Db	D	D
Bihor01	2004-05-18	6:47:31 AM	D	0.62	S	187	Db	Db	D	F
Bihor01	2004-05-18	6:47:31 AM	D	0.70	S	402	Db	Db	D	F
Bihor01	2004-06-02	12:39:45 PM	A	0.31	R, S, T	200	Cc	Cc	AsauE	G
Bihor01	2004-12-29	11:18:02 AM	C	0.53	S, T	94	Ca	Ca	CsauG	G
Bihor01	2004-12-29	11:18:02 AM	C	0.63	S, T	61	Ca	Ca	CsauG	CsauE

Loc	Data	Ora	Tip Metodă proprie	DU [u.r.]	Fază afect	Dt [ms]	Tip metodă componente	Tip metodă 6 faze	Tip metodă Leborgne	Tip metodă Bollen
Bihor01	2005-09-07	5:21:27 AM	D	0.50	S	663	Db	Db	B	D
Bihor01	2006-06-01	5:01:33 AM	B	0.41	S	141	Db	Db	B	B
Bihor01	2006-07-08	5:14:26 AM	D	0.34	R	209	Da	Da	B	D
Bihor01	2006-07-09	4:43:35 PM	F	0.74	R	44	Da	Da	F	F
Bihor01	2006-07-09	5:19:04 PM	F	0.72	T	50	Dc	Dc	F	F
Bihor01	2006-09-10	7:23:02 AM	D	0.26	T	107	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2006-09-10	7:23:02 AM	D	0.77	T	82	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2006-09-20	7:43:04 AM	D	0.31	T	94	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2006-09-20	7:43:04 AM	D	0.79	T	82	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2007-01-19	3:39:12 AM	D	0.51	T	159	Dc	Dc	D	D
Bihor01	2007-01-19	3:41:56 AM	D	0.50	R	140	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-01-19	3:41:56 AM	D	0.50	R	147	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-01-19	7:05:11 AM	D	0.08	R	564	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-03-22	4:20:08 AM	D	0.60	R	648	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-05-08	5:23:35 AM	D	0.66	S	648	Db	Db	D	D
Bihor01	2007-05-28	3:17:27 PM	F	0.70	S	229	Db	Db	F	DsauF
Bihor01	2007-05-28	3:27:42 PM	F	0.42	S	62	Db	Db	F	DsauF
Bihor01	2007-05-28	3:46:03 PM	D	0.47	R	142	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-05-28	3:46:03 PM	D	0.52	R	231	Da	Da	D	D
Bihor01	2007-05-28	3:50:38 PM	D	0.49	S	129	Db	Db	D	D
Bihor01	2007-05-28	3:50:38 PM	D	0.72	S	90	Db	Db	D	F
Bihor01	2007-05-28	11:41:18 PM	F	0.70	S	323	Db	Db	F	F
Bihor01	2008-05-05	9:50:30 PM	D	0.64	S	949	Db	Db	D	D
Bihor01	2009-02-24	6:48:02 PM	D	0.48	R	111	Da	Da	D	D
Bihor01	2009-02-24	6:48:02 PM	D	0.53	R	100	Da	Da	D	D
Bihor01	2009-02-24	6:48:02 PM	D	0.78	R	78	Da	Da	D	D
Bihor01	2009-02-24	7:18:20 PM	D	0.53	R	102	Da	Da	D	D
Bihor01	2009-02-25	9:24:03 PM	C	0.31	S, T	78	Ca	Ca	C	CsauE

Loc	Data	Ora	Tip Metodă proprie	DU [u.r.]	Fază afect	Dt [ms]	Tip metodă componente	Tip metodă 6 faze	Tip metodă Leborgne	Tip metodă Bollen
Bihor01	2009-02-25	9:24:03 PM	A	0.33	R, S, T	532	Db	Db	AsauE	A
Bihor01	2009-02-25	9:24:03 PM	A	0.54	R, S, T	629	Db	Db	AsauE	A
Bihor01	2009-02-25	9:24:03 PM	A	0.80	R, S, T	66	Da	Da	AsauE	A
Bihor02	2004-04-19	11:45:48 AM	C	0.77	R, T	346	Cb	Cb	G	C
Bihor02	2004-04-19	11:45:48 AM	A	0.77	R, S, T	1443	Cc	Cc	AsauE	A
Bihor02	2004-04-19	11:45:48 AM	C	0.77	R, T	1645	Cb	Cb	C	G
Bihor02	2006-01-10	12:14:51 AM	D	0.69	R	112	Da	Da	D	D
Bihor02	2006-01-10	6:11:01 AM	D	0.70	S	250	Db	Db	D	D
Bihor02	2006-03-08	7:37:01 AM	A	0.38	R, S, T	2996	Db	Db	AsauE	A
Bihor02	2006-03-08	8:09:15 AM	A	0.88	R, S, T	180	Db	Db	AsauE	G
Bihor02	2007-05-28	11:37:13 PM	D	0.65	S	327	Db	Db	D	B
Bihor02	2007-10-13	9:48:54 AM	D	0.65	T	130	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-24	3:28:54 PM	D	0.21	T	268	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-24	3:28:54 PM	D	0.89	T	327	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-24	3:28:54 PM	D	0.19	T	241	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-24	3:28:54 PM	D	0.19	T	260	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-24	3:28:54 PM	D	0.18	T	474	Dc	Dc	D	D
Bihor03	2008-04-25	6:13:33 AM	B	0.49	R	62	Da	Da	B	B
Bihor03	2009-03-09	1:50:44 PM	F	0.79	T	158	Dc	Dc	F	D
Bihor04	2009-04-30	5:01:57 AM	B	0.12	T	149	Dc	Dc	B	B
Resita01	2003-08-31	12:52:56 AM	C	0.64	R, S	260	Da	Da	C	G
Resita01	2003-08-31	1:59:15 AM	F	0.82	S	132	Db	Db	F	F
Resita01	2004-03-05	9:40:12 AM	C	0.50	R, S	1202	Cc	Cc	CsauG	CsauE
Resita01	2004-03-05	9:40:17 AM	C	0.57	R, S	1150	Cc	Cc	G	CsauE
Resita01	2005-07-02	2:08:25 AM	A	0.76	R, S, T	141	Da	Da	AsauE	A
Resita01	2005-07-02	2:08:25 AM	F	0.86	R	125	Da	Da	F	F
Resita01	2005-07-02	2:08:25 AM	C	0.80	R, S	352	Cc	Cc	G	CsauE
Resita01	2005-07-02	2:19:19 AM	G	0.45	R, S	271	Cc	Cc	C	A

Loc	Data	Ora	Tip Metodă proprie	DU [u.r.]	Fază afect	Dt [ms]	Tip metodă componente	Tip metodă 6 faze	Tip metodă Leborgne	Tip metodă Bollen
Resita01	2005-07-02	2:19:19 AM	G	0.52	R, S	883	Cc	Cc	C	A
Resita01	2005-07-05	8:29:15 AM	C	0.61	R, S	138	Cc	Cc	G	G
Resita01	2005-07-05	8:29:15 AM	G	0.79	S	100	Cc	Cc	C	G
Timis01	10/30/2008	8:20:40 PM	D	0.56	R	121	Da	Da	D	D
Timis01	04/23/2009	2:42:52 AM	D	0.38	R	117	Da	Da	D	D
Timis01	04/24/2009	4:03:43 AM	D	0.49	S	123	Db	Db	D	D
Timis01	05/02/2009	4:10:49 AM	D	0.54	S	109	Db	Db	D	D
Timis01	05/16/2009	5:41:52 AM	D	0.32	R	102	Da	Da	D	D
Timis01	05/21/2009	12:42:57 AM	D	0.39	T	109	Dc	Dc	D	D
Timis01	07/22/2009	3:04:40 AM	D	0.30	T	107	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/06/2009	4:54:13 AM	D	0.42	R	103	Da	Da	D	D
Timis01	08/07/2009	1:15:45 AM	D	0.51	T	78	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/07/2009	1:15:45 AM	D	0.56	T	71	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/07/2009	2:42:39 AM	D	0.51	T	78	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/07/2009	2:42:39 AM	D	0.56	T	91	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/10/2009	3:54:49 AM	D	0.58	T	85	Dc	Dc	D	D
Timis01	08/10/2009	3:54:49 AM	D	0.65	T	83	Dc	Dc	D	B
Timis01	08/10/2009	6:08:34 AM	D	0.23	S	142	Db	Db	D	D
Timis01	08/10/2009	6:08:34 AM	D	0.86	S	272	Db	Db	D	D
Timis01	08/13/2009	2:51:48 AM	D	0.52	R	152	Da	Da	D	D
Timis01	08/17/2009	12:58:43 AM	D	0.43	R	102	Da	Da	D	D
Timis01	08/20/2009	5:08:33 AM	D	0.71	R	108	Da	Da	D	D
Timis01	08/20/2009	5:08:33 AM	D	0.75	R	440	Da	Da	D	D
Timis01	09/12/2009	4:35:09 AM	D	0.30	T	110	Dc	Dc	D	D
Timis01	09/27/2009	2:00:39 AM	D	0.42	R	103	Da	Da	D	D

ANEXA 4 – FORMATUL FIȘIERELOR COMTRADE.

```

am100892.cfg - Notepad
File Edit Format View Help
CDRI AT S.T. TIMISOARA Statia 110 kv Sacalaz OP2,1
48,16A,32D
1,Ir ORTI,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
2,Is ORTI,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
3,It ORTI,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
4,Ih CARPI,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
5,Ir SATCH,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
6,Is SATCH,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
7,It SATCH,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
8,Ih SOLV1,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
9,Ih SOLV2,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
10,Ih CTV2,,,A,0.0742,0.0,0.0,-2048,2047
11,Uro B1B,,,V,0.0980,0.0,0.0,-2048,2047
12,Us0 B1B,,,V,0.0977,0.0,0.0,-2048,2047
13,Uto B1B,,,V,0.0993,0.0,0.0,-2048,2047
14,Uro B2,,,V,0.0996,0.0,0.0,-2048,2047
15,Us0 B2,,,V,0.0984,0.0,0.0,-2048,2047
16,Uto B2,,,V,0.0988,0.0,0.0,-2048,2047
1,dD ORTI,0
2,dH ORTI,0
3,DDH ORTI,0
4,Rar ORTI,0
5,BRarORTI,0
6,db114CAR,0
7,dHextCAR,0
8,DDHexCAR,0
9,RarOZCAR,0
10,BRarCARP,0
11,dMC SOL1,0
12,dH SOL1,0
13,DHMCSOL1,0
14,Rar SOL1,0
15,BRarSOL1,0
16,dMC SOL2,0
17,dH SOL2,0
18,DHMCSOL2,0
19,Rar SOL2,0
20,BRarSOL2,0
21,dD SATC,0
22,dH SATC,0
23,DDH SATC,0
24,Rar SATC,0
25,BRarSATC,0
26,dD CTV2,0
27,dH CTV2,0
28,DDH CTV2,0
29,DMOPCTV2,0
30,BAnCCTV2,0
31,DPBDRRI2,0
32,DDRRI2,0
50
1
1000,4653
01/03/09,04:28:03.315
01/03/09,04:28:03.415

```

Fig.A4.1. Fișierul de configurare.

ANEXA 5 – CONVERSIE DIN FORMATE SPECIALE ÎN FIȘIERE COMTRADE.

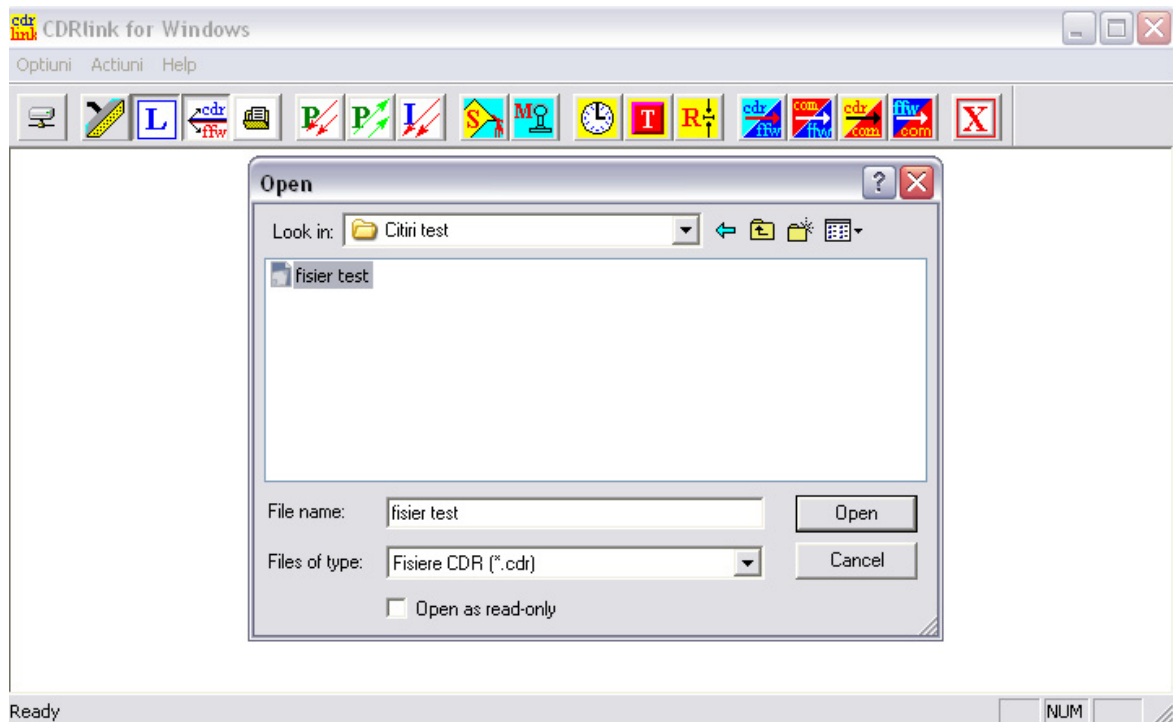


Fig.A5.1. Conversie din fișier .CDR în fișier COMTRADE.

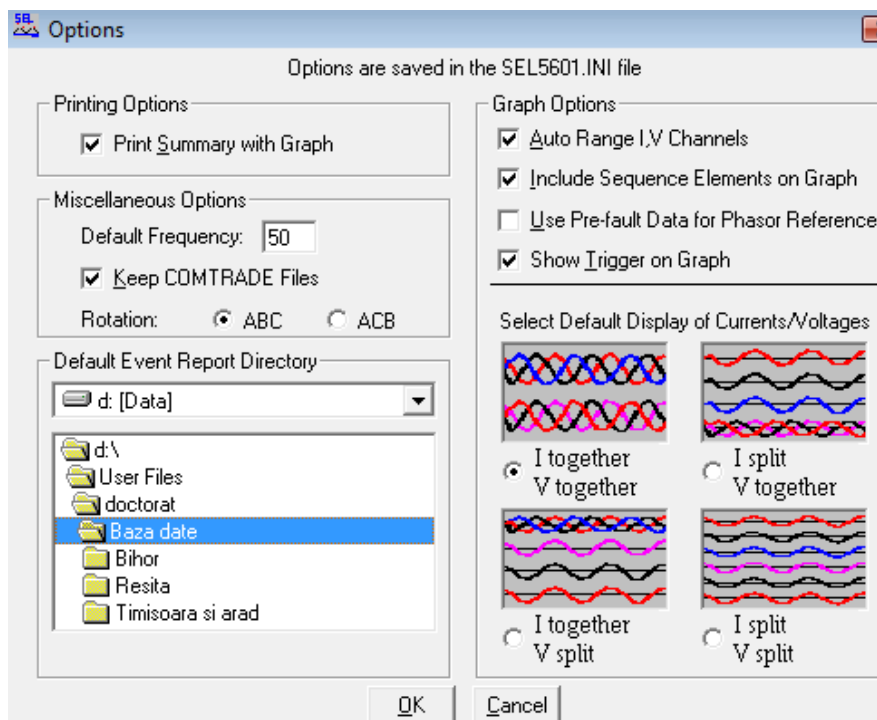


Fig.A5.2. Conversie din fișier .EVE în fișier COMTRADE.

ANEXA 6 – CAPTURĂ DIN PROGRAMUL EVENIMENTE.

Form1

Incarca Salvare excel Salvare text Salvare csv Iesire

Punct de monitorizare: Bihor01
 S.D.E. DEVA
 ST SACALAZ-LEA 110 KV CARPINIS
 ST TIMISOARA seria 27/2004 [0]
 STD TIMISOARA
 S.T. TIMISOARA Statia 110 kv Sacalaz
 Bihor02
 Bihor03
 Bihor04

Data eveniment: 09/01/2003 19:45

Coloane salvate:

Fig.A6.1. Selecție nod electric analizat.

Form1

Incarca Salvare excel Salvare text Salvare csv Iesire

Punct de monitorizare: S.D.E. DEVA

Data eveniment: 18/05/2009 00:48
 09/07/2005 03:55
 17/07/2005 04:18
 01/08/2005 00:45
 07/06/2007 01:43
 18/05/2009 00:48
 20/09/2009 00:46
 04/10/2009 00:46

Coloane salvate:

Fig.A6.2. Selecție eveniment ce se dorește analizat.

Form1

Incarca Salvare excel Salvare text Salvare csv Iesire

Punct de monitorizare: S.D.E. DEVA

Data eveniment: 07/06/2007 01:43

Nr	CURENT FAZA R [A]	TENSIUNE FAZA R [V]	CURENT FAZA S [A]	TENSIUNE FAZA S [V]	CURENT FAZA T [A]	TENSIUNE FAZA T [V]	CURENT HOMOPOLAR [A]	TENSIUNE HOMOPOLARA [V]
1	29.556	93002.911482	9.894	-11496.3200...	-59.4216	-78443.75125	-108.24	2857.25
2	9.852	74803.961192	9.894	18993.920152	-39.6144	-92877.40148	-108.24	1028.61
3	-19.704	51082.570814	-29.682	47609.760381	-49.518	-99403.921584	-118.08	-342.87
4	9.852	22591.80036	9.894	72101.920577	-29.7108	-95011.071514	-98.4	114.29
5	-9.852	-8409.170134	-49.47	90845.920727	-89.1324	-80953.95129	-127.92	1942.93
6	49.26	-38029.530606	-19.788	99343.200795	-29.7108	-59742.760952	-118.08	1942.93
7	9.852	-64135.611022	-9.894	98718.40079	-39.6144	-33260.15053	-108.24	1714.35
8	9.852	-86350.881376	-39.576	88096.800705	-49.518	-2886.730046	-118.08	-685.74
9	49.26	-98274.331566	-39.576	67978.240544	-39.6144	25980.570414	-108.24	-3428.7

Coloane salvate:

Fig.A6.3. Vizualizarea informațiilor din fișierul care conține evenimentul selectat.

BIBLIOGRAFIE

1. [Ala1999] Ala, G., Barone, A.B., Favuzza, S., Inzerillo, M., *Influence of MV Distribution Networks Structure on Voltage Dips Propagation*, PowerTech Budapest 99. International Conference on Electric Power Engineering, 29 Aug. - 02 Sept. 1999, Budapest, Hungary, pp.221.
2. [Albert1998] Albert Hermina, Golovanov, N., Lungu, I., Lavrov, G., *Considerații privind calitatea energiei electrice livrate*, Editura RENEL – GSCI, București, 1998.
3. [Axelberg2007] Axelberg, P.G.V., Gu, I.Y.H., Bollen, M.H.J., *Automatic Classification of Voltage Events Using The Support Vector Machine Method*, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May, 2007, paper 888.
4. [Baggini2008] Baggini, A., *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons Ltd, Italy, 2008.
5. [Balint2005] Balint, R., Buta, A., **Molnar-Matei, F.**, *The Magnetic Fields Particularity Product of Overhead Lines That Feeding The Railway Electrical Stations*, 7th International Conference on Applied Electromagnetics, Nis, 23-25 May 2005.
6. [Bhattacharya2001] Bhattacharya, K., Bollen, M.H.J., Daalder, J.E., *Operation of Restructured Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, London, 2001.
7. [Boldea2002] Boldea, I., Nasar, S.A., *The Induction Machine Handbook*, CRC Press, 2002.
8. [Bollen1996] Bollen, M.H.J., Yalcinkaya, G., Pellis, J., Qader, M.R., *A Voltage Sag Study in a Large Industrial Distribution System*, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96, San Diego, USA, 6-10 October, 1996, pp.2372-2377.
9. [Bollen1997] Bollen, M.H.J., *Characterisation of Voltage Sag Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drives*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997, pp.1666-1671.
10. [Bollen2000a] Bollen, M.H.J., *Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*, NY: IEEE Press, New York, 2000.
11. [Bollen2000b] Bollen, M.H.J., Styvaktakis, E., *Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips (as easy as one two three?)*, The IEEE Power Summer Meeting, Seattle, WA, July 16–20, 2000.
12. [Bollen2003a] Bollen, M.H.J., *Algorithms for Characterizing Measured Three-Phase Unbalanced Voltage Dips*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, No.3, July 2003, pp.937-944.
13. [Bollen2003b] Bollen, M.H.J., Hager, M., Roxenius, C., *Effect of Induction Motors and Other Loads on Voltage Dips: Theory and Measurements*, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Vol.3, 23-26 June 2003, Bologna, Italy.
14. [Bollen2003c] Bollen, M.H.J., Zhang, L.D., *Different Methods for Classification of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults*, Electric Power Systems Research, Vol.66, No.1, 2003, pp. 59-69.
15. [Bollen2004a] Bollen, M.H.J., Goossens, P., Robert, A., *Assessment of Voltage Dips in HV-Networks Deduction of Complex Voltages From the*

- Measured RMS Voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.2, April 2004, pp.783-790.
16. [Bollen2004b] Bollen, M.H.J., Hager, M., *Power Quality: Interactions Between Distributed Energy Resources, the Grid, and Other Customers*, First International Conference on Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources, Brussels, December 2004.
 17. [Bollen2006] Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H., *Signal Processing of Power Quality, Disturbances*, John Wiley & Sons Ltd, 2006.
 18. [Buta2001] Buta, A., Pană, A., Milea, L., *Calitatea energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2001.
 19. [Buta2005] Buta, A., Toader, D., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Aspecte noi privind definirea puterilor în rețelele electrice care funcționează în regimuri nesimetrice și nesinusoidale*, Zilele Academice, Timișoara 2005.
 20. [Chiosa2005a] Chiosa, N., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, Buta, A., *Aspecte particulare în alimentarea consumatorilor de servicii proprii ale stațiilor RET*, Simpozionul Național – Siguranța în funcționarea sistemului electroenergetic, Sinaia 2005, pp.177-184.
 21. [Chiosa2005b] Chiosa, N., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, Buta, A., *The Particularities of the Load Curves of Specific Services RET Stations*, Proceedings of the 6th International Power Systems Conference, 3-4 November, Timișoara 2005, pp.135-140.
 22. [Ciocârlie2007a] Ciocârlie, H., *Limbaje de programare. Concepte fundamentale*, Editura de Vest, 2007.
 23. [Ciocârlie2007b] Ciocârlie, H., Ciocârlie, R., *Utilizarea și programarea calculatoarelor (ediția a 2-a revizuită și adăugită)*, Orizonturi Universitare, 2007.
 24. [Conrad1989] Conrad, L., Grigg, C., Little, K., *Predicting and Preventing Problems Associated With Remote Fault Clearing Voltage Dips*, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 7-11 May 1989, Chicago, IL, USA, pp.74-78.
 25. [Corcoles1999] Corcoles, F., Pedra, J., *Algorithm for the Study of Voltage Sags on Induction Machines*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, December 1999, pp.959-968.
 26. [Crețu2000] Crețu, V., *Structuri de date algoritmi. Structuri de date fundamentale*, Vol.1, Editura "Orizonturi Universitare" Timișoara, 2000.
 27. [Crețu2006] Crețu, V., *Software Project Management*, curs suport electronic, 2006.
 28. [Dagenhart1987] Dagenhart, J.B., Dalton, J.G., *New Techniques Developed to Ensure Quality Power, Transmission and Distribution*, 39(5), 1987.
 29. [Das1990] Das, J.C., *Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.26, No.4, Jul/Aug 1990, pp.711-718.
 30. [Degeneff2000] Degeneff, R.C., Barss, R., Carnovale, D., Raedy, S., *Reducing The Effect of Sags and Momentary Interruptions: A Totalowning Cost Prospective*, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol.2, 01-04 Oct. 2000, Orlando, FL, USA, pp.397-403.
 31. [Didden2005] Didden, M., De Jaeger, E., D'haeseleer, W., Belmans, R., *How to Connect a Voltage Sag-Measuring Device: Phase to Phase or Phase to Neutral?*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, April 2005, pp.1174-1181.

32. [DiPerna2003] Di Perna, C., Verde, P., Sannino, A., Bollen, M.H.J., *Static Series Compensator for Voltage Dip Mitigation With Zero-Sequence Injection Capability*, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Vol.4, 23-26 June 2003, Bologna, Italy.
33. [Djokic2005a] Djokic, S.Z., Milanovic J.V., Chapman, D.J., McGranaghan, M.F., *Shortfalls of Existing Methods for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, April 2005, pp.1640-1649.
34. [Djokic2005b] Djokic, S.Z., Milanovic J.V., Chapman, D.J., McGranaghan, M.F., Kirschen, D.S., *A New Method for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.4, October 2005, pp.2576-2584.
35. [Dordea1977] Dordea, T., *Maşini electrice*, EDP Bucuresti, 1977.
36. [Dorr1992] Dorr, D.S., *Power Quality Study – 1990 to 1995 – Initial Results.*, APEC '92, Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 23-27 Feb., 1992, Boston, MA, USA.
37. [Dugan2003] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W., *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, 2003.
38. [Eremia2006] Eremia, M., Song, I.H., Hatzargyriou, N., Buta, A., Cartina, G., Toma, L., *Electric Power Systems, Volume I, Electric Networks*. Publishing House of the Romanian Academy, 2006.
39. [Escobar2002] Escobar, G., Stankovic, A.M., Cardenas, V., Mattavelli, R., *A Controller to Compensate Voltage Sags, Unbalance and Harmonic Distortion Using a Series Active Filter*, Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Vol.3, 10-13 Dec. 2002, pp.3091-3096.
40. [Farahbakhsh2007] Farahbakhsh, A., Jalilian, A., *Operation of Induction Motor-Drive under Different Voltage Sag Conditions*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07), Vigo, Spain, 27-30 March, paper 225.
41. [Florio2004] Florio, A., Mariscotti, A., Mazzucchelli, M., *Voltage Sag Detection Based on Rectified Voltage Processing*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.4, October 2004, pp. 1962-1967.
42. [Fouad1990] Fouad, A.A., Sreedhara, R., *Transient Voltage Dip Analysis Using the Transient Energy Function Method*, Proceedings of the Twenty-Second Annual North American, 15-16 Oct. 1990, pp.264-273.
43. [Fouilloux1991] Fouilloux, J.M., Duphil, N., *Perceived and Physical Quality of Electricity: Towards the QUALIMAT*, CIRED, 11th International Conference on Electricity Distribution, 22-26 April 1991, Liege, Belgium.
44. [Gencer2009] Gencer, O., Ozturk, S., Erfidan, T., *A New Approach to Voltage Sag Detection Based on Wavelet Transform*, Electrical Power and Energy Systems, article in press, 2009.
45. [Gomez2000] Gomez, J.C., Campetelli, G.N., *Voltage Sag Mitigation by Current Limiting Fuses*, Proceedings of World Congress of Industrial Applications of Electrical Energy and 35th IEEE-IAS Annual Meeting, 8-12 Oct. 2000, Rome, Italy.
46. [Gomez2002] Gomez, J.C., Morcos, M.M., Reineri, C.A., Campetelli G.N., *Behavior of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.2, April 2002, pp.434-440.
47. [Guasch2004] Guasch, L., Córcoles, F., Pedra J., *Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.2, April 2004, pp.774-782.

48. [Gupta2004] Gupta, C.P., Milanovic, J.V., Aung, M.T., *The Influence of Process Equipment Composition on Financial Losses Due to Voltage Sags*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12-15 Sept. 2004, pp.28-34.
49. [Heine2002] Heine, P., Pohjanheimo, P., Lehtonen, M., Lakervi, E., *A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags*, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.17, No.2, May 2002, pp.290-296.
50. [Heydt1991] Heydt, G.T., *Electric Power Quality*, Stars in Circle Publications, 1991.
51. [Ignatova2005] Ignatova, V., Granjon, P., Bacha, S., Dumas, F., *Classification and Characterization of Three Phase Voltage Dips by Space Vector Methodology*, IEEE International Conference on Future Power Systems 2005, Amsterdam, Netherlands, 2005.
52. [Ignatova2009] Ignatova, V., Granjon, P., Bacha, S., *Space Vector Method for Voltage Dips and Swells Analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.24, No.4, October 2009, pp.2054-2061.
53. [Immanuel2006] Immanuel, V. Yankanchi, G., *Voltage Sag Compensation Technique for Three-Level Voltage Source Inverter Based Dynamic Voltage Restorer*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 9-13 July 2006, Vol.3, Montreal, Que., Canada, pp.1652-1657.
54. [Iordache1997] Iordache Mihaela, Conecini, I., *Calitatea energiei electrice*, Editura tehnică, București, 1997.
55. [Jian2001] Jian, I., *Baze de date*, Editura Mirton, Timișoara, 2001.
56. [Kagan2000] Kagan, N., Ferrari, E.L., *Influence of RMS Variation Measurement Protocols on Electrical System Performance Indices for Voltage Sag and Swell*, Proceedings of 2000 International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1-4 Oct., 2000, Orlando, FL, USA.
57. [Kai1998] Kai, Y., Koval, D., Wilsun X., Salmon, J., *An Investigation of Voltage Sags by a Phasor Methodology*, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol.2, 24-28 May 1998, pp.689-692.
58. [Kilyeni2001] Kilyeni Ștefan, *Metode numerice – Algoritme, programe Turbo Pascal, Aplicații în energetică*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001.
59. [Kilyeni2004] Kilyeni, Ș., Groza, D., Limbean, G., *Metode numerice. Algoritme, programe, aplicații în energetic, Lucrări practice*, ed. 3, Orizonturi Universitare, Timișoara, 2004.
60. [Koval1996] Koval, D.O., Hughes, M.B., *Frequency of Voltage Sags at Industrial and Commercial Sites in Canada*, Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical And Computer Engineering, 26-29 May, 1996, Calgary, Canada.
61. [Krause2002] Krause, P.C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S.D., *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 2002.
62. [Kyei2002] Kyei, J., Ayyanar, R., Heydt, G., Thallam, R., Blevins, J., *The Design of Power Acceptability Curves*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.3, July 2002, pp.828-833.
63. [Lamoree1993] Lamoree, J., Mueller, D., Vinett, P., Jones, W., *Voltage Sag Analysis Case Studies*, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2-6 May 1993, St. Petersburg, FL, USA, pp.55-61.
64. [Leborgne2003] Leborgne, R.C., Filho, J.M.C., et al., *Alternative Methodology for Characterization of Industrial Process Sensibility to Voltage Sags*, 2003 IEEE Bologna PowerTech, 23-26 June 2003, Bologna, Italy.

65. [Leborgne2004] Leborgne, R.C., Olguin, G., Bollen, M.H.J., *The Influence of PQ-Monitor Connection on Voltage Dip Measurements*, Proceedings of IEE MedPower, Nov. 2004, Cyprus.
66. [Leborgne2006a] Leborgne, R.C., Olguin, G., Carvalho Filho, J.M., Bollen, M.H.J., *Effect of PQ-monitor Connection on Voltage Dip Indices: PN vs PP Voltages*, Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine, Vol.II, No.1, 2006, pp.19-26.
67. [Leborgne2006b] Leborgne, R.C., Chen, P., *Using PQ-Monitor and PMU for Voltage Sag Extended-Characterization*, 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 15-18 August, 2006.
68. [Leborgne2007] Leborgne, R.C., Olguin, G., Carvalho Filho, J.M., Bollen, M.H.J., *Differences in Voltage Dip Exposure Depending Upon Phase-to-Phase and Phase-to-Neutral Monitoring Connections*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, No.2, April 2007, pp.1153-1159.
69. [Leiria2006] Leiria, A., Nunes, P., Morcheda, A., Correia de Barros, M.T., *Induction Motor Response to Voltage Dips*, Electric Power Systems Research, No.76, 2006, pp.676-680.
70. [Madrigal2007] Madrigal, M., Rocha, B.H., *A Contribution for Characterizing Measured Three-Phase Unbalanced Voltage Sags Algorithm*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, No.3, July 2007, pp.1885-1890.
71. [Martinez2004] Martinez, J.A., Martin-Arnedo, J., *Voltage Sag Stochastic Prediction Using an Electromagnetic Transients Program*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.19, No.4, Oct. 2004, pp. 1975-1982.
72. [Meynaud1983] Meynaud, P., *The Quality of the Voltage in The Supply of Electrical Energy*, 2nd Colloque National et Exposition sur la Compatibilite Electromagnetique, 1-3 June, 1983, Tregastel, France.
73. [Milanovic2008a] Milanovic, J.V., Aung, M.T., Vegunta, S.C., *The Influence of Induction Motors on Voltage Sag Propagation-Part I: Accounting for the Change in Sag Characteristics*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.2, April 2008, pp.1063-1071.
74. [Milanovic2008b] Milanovic, J.V., Aung, M.T., Vegunta, S.C., *The Influence of Induction Motors on Voltage Sag Propagation-Part II: Accounting for the Change in Sag Performance at LV Buses*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.2, April 2008, pp.1072-1078.
75. [Moga1989] Moga, M., *Identificarea și estimarea caracteristicilor statice și dinamice ale marilor consumatori complecși (platforme industriale) din sistemul energetic*, Teză de Doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1989.
76. [Moga1990] Moga, M., *Reprezentarea motoarelor de inducție prin caracteristici dinamice de putere funcție de tensiune și frecvență*, Energetica nr.8-9, 1990, pp.349-355.
77. [Moga1991] Moga, M., *Caracteristicile dinamice liniarizate ale motorului de inducție*, Energetica, nr.2-B, 1991, pp.70-76.
78. [Moga2007] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, *Advantages of Using of the Topological Indices for the Distribution Networks Representation*, EUROCON 2007-The International Conference on "Computer as a Tool", Warsaw, 09-12 September 2007, pp.1387-1391.
79. [Moga2008a] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, *Using of the Topological Indices for Reconfiguration Operations and States Computations*, WEC Regional Energy Forum – FOREN 2008, Neptun, 15-19 June 2008.

80. [Moga2008b] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, Dale, L., *Simulation Software of the Voltage Sags Effects on Power System Loads*, 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008, pp.148-154.
81. [Moga2009] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, Biriescu, M., *Application Software for Minimum Loss Configuration of the Distribution Networks*, IEEE Region 8 EUROCON 2009 International Conference, 18-23 May, 2009, Saint - Petersburg, Russia.
82. [Molnar2009] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., *Considerations about voltage sags detection techniques in electrical networks*, Proceedings of the 8th International Power Systems Conference, 4-7 November 2009, Timisoara, pp.313-320.
83. [Molnar2010a] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., Pană, A., *New Method for Voltage Sags Characteristics Detection in Electrical Networks*, MELECON 2010 - The 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, accepted for publication, 2010.
84. [Molnar2010b] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., Băloi, A., *Software for Analysing Unbalanced Voltage Sags Effects on Power System Loads*, UPEC 2010 - 45th International Universities' Power Engineering Conference, to be published, 2010.
85. [Mora2003a] Mora, J., Llanos, D., Meléndez, J., Sánchez, J., Corbella, X., *Classification of Sags Measured in a Distribution Substation Based on Qualitative and Temporal Descriptors*, 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May, 2003, paper 60.
86. [Mora2003b] Mora, J., Llanos, D., Meléndez, J., Ruiz, M., Colomer, J., Sánchez, J., *Classification of Short Duration Faults (Voltage Sags) in Transmission and Distribution Power Systems*, European Control Conference, University of Cambridge, 1-4 September, 2003.
87. [Naidoo2007] Naidoo, R., Pillay, P., *A New Method of Voltage Sag and Swell Detection*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, No.2, April 2009, pp.1056-1063.
88. [Nemeş1998] Nemeş, M., *Sisteme electrice de putere*, Editura Politehnica Timișoara, 1998.
89. [Ohrstrom2003] Ohrstrom, M., Soder, L., *A Comparison of Two Methods Used for Voltage Dip Characterisation*, 2003 IEEE Bologna PowerTech, 23-26 June, 2003, Bologna, Italy.
90. [Pană2007a] Pană, A., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Experimental Validation of Power Mechanism for Load Balancing Using Variable Susceptances in Three Phase Four Wire Distribution Networks*, EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool", 09-12 September, Warsaw 2007, pp.1567-1572.
91. [Pană2007b] Pană, A., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Application of the State Variables Method on Quickly Evaluation of the Harmonic Resonance Frequencies in a Transmission Line*, EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool", 09-12 September, Warsaw 2007, pp.1573-1578.
92. [Pedra2007] Pedra, J., Sainz, L., Corcoles, F., *Effects of Symmetrical Voltage Sags on Squirrel-Cage Induction Motors*, Electric Power Systems Research, No.77, 2007, pp.1672-1680.

93. [Perez2008] Perez, E., Barros, J., *An Extended Kalman Filtering Approach for Detection and Analysis of Voltage Dips in Power Systems*, Electric Power Systems Research, No.78, 2008, pp.618-625.
94. [Popescu] Popescu, M., Popescu, F., *Calitatea energiei electrice livrate. Indici de calitate a tensiunii electrice în prezența regimului deformant*, Energetica 31(4), 182-9.
95. [Powers2006] Powers, L., Snell, M., *Microsoft Visual Studio 2005 Unleashed*, Sams Press, 2006.
96. [Qader1999] Qader, M.R., Bollen, M.H.J., Allan, R.N., *Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.35, No.1, Jan/Feb 1999, pp.152-162.
97. [Ran2001] Ran, C., Jianfeng, Z., Weiwei, S., Ping J., Guoqing, T., *Series Power Quality Compensator for Voltage Sags, Swells, Harmonics and Unbalance*, 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol.1, 28 Oct. - 02 Nov. 2002 Atlanta, Georgia, pp. 543-547.
98. [Rendroyoko2002] Rendroyoko, I., Morrison, R.E., Wong, P.K.C., *Load Influence on Voltage Dip Characteristics*, AUPEC'02 Monash University Melbourne, 29 Sept - 2 Oct, 2002, paper 203.
99. [Sannino2000] Sannino, A., Svensson, J., *A Series-Connected Voltage Source Converter for Voltage Sag Mitigation Using Vector Control and a Filter Compensation Algorithm*, Proceedings of World Congress of Industrial Applications of Electrical Energy and 35th IEEE-IAS Annual Meeting, 8-12 Oct. 2000, Rome, Italy.
100. [Sannino2001] Sannino, A., Svensson, J., *Application of Converter-Based Series Device for Voltage Sag Mitigation to Induction Motor Load*, 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, Vol.2, 10-13 Sept. 2001, Porto, Portugal.
101. [Schach2006] Schach, S., *Object-Oriented and Classical Software Engineering*, Seventh Edition, McGraw-Hill, 2006.
102. [Sharp2005] Sharp, J., *Microsoft Visual C# 2005 Step by Step*, Microsoft Edition, 2005.
103. [Silva2002] Silva, S.M., Filho, B.J.C., *Component-Minimized Voltage Sag Compensators*, Industry Applications Conference, Conference Record of the 37th IAS Annual Meeting, Vol.2, 2002, pp.883-889.
104. [Smith2002] Smith, S.W., *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*, SoftCover, 2002.
105. [Stockman2005] Stockman, K., D'hulster, F., Belmans, R., *Cost Effective Solutions to Increase the Immunity of AC Drives Against Voltage Dips*, 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, Dresden.
106. [Surapong2000] Surapong, C., Yu, C.Y., Thukaram, D., Nipon, T., Damrong, K., *Minimization of the Effects of Harmonics and Voltage Dip Caused by Electric arc Furnace*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000, Vol.4, 2000, pp.2568-2576.
107. [Sushama2009] Sushama, M., Tulasi Ram Das, G., *Detection and Classification of Voltage Sags Using Adaptive Decomposition and Wavelet Transforms*, International Journal of Electrical and Power Engineering 3, 2009, pp.50-58.
108. [Tian2004] Tian, H.Y., Sng, E.K.K., *A Novel Solution to Restore a Three-Phase Thyristor Inverter From Commutation Failure Due to Voltage Dip*, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.2, 20-25 June 2004, pp.906-912.

109. [Toader2005] Toader, D., Buta, A., Blaj, C., **Molnar-Matei, F.**, Băloi, A., *New Aspects About Power Definition in Electric Circuits*, International Journal Electronics, Vol.7, No.2, University of Banja Luka, 2005, pp.105.
110. [Tourn2006] Tourn, D.H., Amatti, J.C., Gómez, J.C., Florena, E.F., *Behavior of the Scheme Source - Capacitor - Induction Motor When Voltage Sags and Short Interruptions Take Place*, 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 15-18 August, 2006.
111. [Velicescu1998] Velicescu, C., Oprea, L., *Modelarea și simularea regimurilor tranzitorii din sistemul electroenergetic*, Editura Tehnică, 1998.
112. [Velicescu2000] Velicescu, C., *Siguranța în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor electrici*, Editura Agir, București, 2000.
113. [Viawan2005] Viawan, F.A., Reza, M., *The Impact of Synchronous Distributed Generation on Voltage Dip and Overcurrent Protection Coordination*, International Conference on Future Power Systems, 18-18 Nov. 2005, Amsterdam, Netherland.
114. [Villiers2008] Villiers, W., Cloete, J.H., Wedepohl, L.M., Burger, A., *Real-Time Sag Monitoring System for High-Voltage Overhead Transmission Lines Based on Power-Line Carrier Signal Behavior*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.1, January 2008, pp.389-395.
115. [Wang2005] Wang, J., Chen, S., Lie, T.T., *System Voltage Sag Performance Estimation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, April 2005, pp. 1738-1747.
116. [Won2005] Won, D.J., Ahn, S.J., Moon, S.I., *Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.4, April 2005, pp.2638-2643.
117. [Yalcinkaya1998] Yalcinkaya, G., Bollen, M.H.J., Crossley, P.A., *Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, No.4, July/August, 1998, pp.682-688.
118. [Yebra2007] Yebra, T., Fuster, V., Quijano, A., García, M., *Most Representative Parameters of Voltage Dips*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07), Vigo, Spain, 27-30 March, 2007, paper 207.
119. [Zenglu2008] Zenglu, C., Pei Z., Ise, T., Yanfang L., Zhaoan W., *A Novel Transformer-less Series Voltage Sag Compensator Without Energy Storage Capacitors and Its New Time Optimal Control Strategy*, 39th Power Electronic Specialists Conference (PESC 2008), 15-19 June 2008, Rhodes, Greece.
120. [Zhang2000] Zhang, L., Bollen, M.H.J., *Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.2, April 2000, pp. 827-832.
121. [Zlomek2005] Zlomek, M., Fiala, P., *Numerical Modelling and Experimental Assessment of Voltage Sags Effects on Induction Machine Operation*, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, March 13-15, 2005, pp.190-193.
122. [EN50160] ***EN 50160 – *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system*, CENELEC, 1999.
123. [EURELECTRIC2002] ***EURELECTRIC, *Power Quality in European Electricity Supply Networks - 1st edition*, NE Standardization Specialist Group, N-E EMC & Harmonics, 2002.

124. [IEEE1100] ***IEEE Std. 1100-1999, *IEEE Recommended Practice for Power and Grounding Electronic Equipment*.
125. [IEEE1159] ***IEEE Std. 1159-1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Press, June 1995.
126. [IEEE1564] ***IEEE Std. 1564-2004, *Draft Recommended practice for The Establishment of Voltage Sag Indices*, Draft 6, June 2004.
127. [C37.111-1991] ***IEEE C37.111-1991, *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Press, June 1991.
128. [C37.111-1999] ***IEEE C37.111-1999, *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, (Revision of IEEE C37.111-1991), IEEE Press, March 1999.
129. [IEC61000-2-1] ***IEC 61000-2-1, *Description of the Environment. Electromagnetic environment for Low-Frequency conducted disturbance and Signaling in Public Power Supply Systems*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2, Section 1, 1990.
130. [IEC61000-2-2] ***IEC 61000-2-2, *Environment. Compatibility Levels for Low Frequency Conducted Disturbance and Signaling in Public Low-Voltage Power Supply Systems*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2, Section 2.
131. [IEC61000-2-8] ***IEC 61000-2-8, *Environment. Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2, Section 8, 2000.
132. [IEC61000-2-12] ***IEC 61000-2-12, *Environment. Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbance and Signaling in Public Medium-Voltage Power Systems*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2, Section 12, 1995.
133. [IEC61000-3-6] ***IEC 61000-3-6, *Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3, Section 6.
134. [IEC61000-4-11] ***IEC 61000-4-11, *Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4, Section 11, 2004.
135. [IEC61000-4-15] ***IEC 61000-4-15, *Testing and Measurement Techniques. Flickermeter - Functional and Design Specification*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4, Section 15, 1997.
136. [IEC61000-4-27] ***IEC 61000-4-27, *Testing and Measurement Techniques. Unbalance, Immunity Test*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4, Section 27, 2000.
137. [IEC61000-4-30] ***IEC 61000-4-30, *Testing and Measurement Techniques. Power Quality Measurement Methods*, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4, Section 30, 2008.
138. [PE143/1994] ***PE 143/1994, *Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice*, ICEMENERG, București, 1994.
139. [PE143/2001] ***PE 143/2001, *Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice*, TRANSELECTRICA SA, 2001.
140. [PE142/2001] ***PE 142/2001, *Normativ privind combaterea efectului de flicker în rețelele de distribuție*, ISPE-SA, București, 2001.
141. [SREN50160] ***SREN50160, *Caracteristicile tensiunii furnizate de rețelele publice de distribuție*, 2003.

142. [SREN61000-4-7] ***SREN61000-4-7, *Tehnici de încercare și de măsurare. Ghid general referitor la măsurarea și aparatul pentru măsurarea armonicilor și interarmonicilor, aplicabil rețelelor de alimentare și echipamentelor conectate la acestea*, Compatibilitate electromagnetică (CEM), Partea 4, Secțiunea 7, 2002.
143. [***2004a] ***Contract 419/20.09.2004, *Cercetări privind monitorizarea și analiza efectelor poluante ale instalațiilor de transport a energiei electrice*. Program MENER, 2004 – 2006.
144. [***2004b] ***Contract 2144/15.10.2004, *Cercetări privind aplicabilitatea în Întreprinderile Mici și Mijlocii a unei familii de echipamente pentru măsurarea și înregistrarea parametrilor energetici*. Program RELANSIN, 2004 – 2006.
145. [***2004c] ***Contract 535/04.11.2004 (BC 176/15.11.2004), *Studiul fenomenului de poluare electromagnetică (regim nesimetric, regim nesinusoidal, goluri de tensiune) produs în rețeaua de alimentare cu energie electrică a SDFEE Reșița de funcționarea cuptoarelor electrice de la CS Reșița*. Beneficiar ELECTRICA BANAT, 2004.
146. [***2004d] ***Contract 524/29.11.2004, *Metodă și sistem pentru măsurarea, înregistrarea în timp real a parametrilor ce caracterizează calitatea energiei electrice în vederea compatibilizării cu normele UE*. Program MENER, 2004 – 2006.
147. [***2005] ***Contract nr.100/2005, *Noi metode, tehnologii ecologice și concepte de soluții aplicabile conform standardelor europene de creștere a calității energiei electrice*. Program CEEEX, 2005 – 2008.
148. [***C#1] ***<http://zedgraph.sourceforge.net/documentation/default.html>.
149. [***C#2] ***<http://www.codeproject.com/KB/cs/>
150. [***C#3] **[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/k1s94fta\(VS.71\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/k1s94fta(VS.71).aspx)
151. [***NEXUS2003] ***<http://www.electroind.com/nexus1250.html>.
152. [***PCI-6023] ***<http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/10967>.

SINTEZĂ PRIVIND LUCRĂRILE PROPRII

1. [Balint2005] Balint, R., Buta, A., **Molnar-Matei, F.**, *The Magnetic Fields Particularity Product of Overhead Lines That Feeding The Railway Electrical Stations*, 7th International Conference on Applied Electromagnetics, Nis, 23-25 May 2005.
2. [Buta2005] Buta, A., Toader, D., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Aspecte noi privind definirea puterilor in rețelele electrice care funcționează in regimuri nesimetrice și nesinusoidale*, Zilele Academice, Timișoara 2005.
3. [Chiosa2005a] Chiosa, N., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, Buta, A., *Aspecte particulare in alimentarea consumatorilor de servicii proprii ale stațiilor RET*, Simpozionul Național – Siguranța in functionarea sistemului electroenergetic, Sinaia 2005, pp.177-184.
4. [Chiosa2005b] Chiosa, N., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, Buta, A., *The Particularities of the Load Curves of Specific Services RET Stations*, Proceedings of the 6th International Power Systems Conference, 3-4 November, Timisoara 2005, pp.135-140.
5. [Moga2007] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, *Advantages of Using of the Topological Indices for the Distribution Networks Representation*, EUROCON 2007-The International Conference on "Computer as a Tool", Warsaw, 09-12 September 2007, pp.1387-1391.
6. [Moga2008a] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, *Using of the Topological Indices for Reconfiguration Operations and States Computations*, WEC Regional Energy Forum – FOREN 2008, Neptun, 15-19 June 2008.
7. [Moga2008b] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, Dale, L., *Simulation Software of the Voltage Sags Effects on Power System Loads*, 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008, pp.148-154.
8. [Moga2009] Moga, M., **Molnar-Matei, F.**, Biriescu, M., *Application Software for Minimum Loss Configuration of the Distribution Networks*, IEEE Region 8 EUROCON 2009 International Conference, 18-23 May, 2009, Saint - Petersburg, Russia.
9. [Molnar2009] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., *Considerations about voltage sags detection techniques in electrical networks*, Proceedings of the 8th International Power Systems Conference, 4-7 November 2009, Timisoara, pp.313-320.
10. [Molnar2010a] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., Pană, A., *New Method for Voltage Sags Characteristics Detection in Electrical Networks*, MELECON 2010 - The 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, accepted for publication, 2010.
11. [Molnar2010b] **Molnar-Matei, F.**, Moga, M., Băloi, A., *Software for Analysing Unbalanced Voltage Sags Effects on Power System Loads*, UPEC 2010 - 45th International Universities' Power Engineering Conference, to be published, 2010.
12. [Pană2007a] Pană, A., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Experimental Validation of Power Mechanism for Load Balancing Using Variable Susceptances in Three Phase Four Wire Distribution Networks*, EUROCON 2007 - The

- International Conference on "Computer as a Tool", 09-12 September, Warsaw 2007, pp.1567-1572.
13. [Pană2007b] Pană, A., Băloi, A., **Molnar-Matei, F.**, *Application of the State Variables Method on Quickly Evaluation of the Harmonic Resonance Frequencies in a Transmission Line*, EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool", 09-12 September, Warsaw 2007, pp.1573-1578.
14. [Toader2005] Toader, D., Buta, A., Blaj, C., **Molnar-Matei, F.**, Băloi, A., *New Aspects About Power Definition in Electric Circuits*, International Journal Electronics, Vol.7, No.2, University of Banja Luka, 2005, pp.105.
15. [***2004a] ***Contract 419/20.09.2004, *Cercetări privind monitorizarea și analiza efectelor poluante ale instalațiilor de transport a energiei electrice*. Program MENER, 2004 – 2006.
16. [***2004b] ***Contract 2144/15.10.2004, *Cercetări privind aplicabilitatea în Întreprinderile Mici și Mijlocii a unei familii de echipamente pentru măsurarea și înregistrarea parametrilor energetici*. Program RELANSIN, 2004 – 2006.
17. [***2004c] ***Contract 535/04.11.2004 (BC 176/15.11.2004), *Studiul fenomenului de poluare electromagnetică (regim nesimetric, regim nesinusoidal, goluri de tensiune) produs în rețeaua de alimentare cu energie electrică a SDFEE Reșița de funcționarea cuptoarelor electrice de la CS Reșița*. Beneficiar ELECTRICA BANAT, 2004.
18. [***2004d] ***Contract 524/29.11.2004, *Metodă și sistem pentru măsurarea, înregistrarea în timp real a parametrilor ce caracterizează calitatea energiei electrice în vederea compatibilizării cu normele UE*. Program MENER, 2004 – 2006.
19. [***2005] ***Contract nr.100/2005, *Noi metode, tehnologii ecologice și concepte de soluții aplicabile conform standardelor europene de creștere a calității energiei electrice*. Program CEEEX, 2005 –2008.