COLTUC DINU Digitally signed by COLTUC DINU
Date: 2016.10.27 19:46:28 +03'00'

MINISTERUL EDUCAŢIEI NAŢIONALE
UNIVERSITATEA „VALAHIA” DIN TÂRGOVIŞTE
IOSUD–ŞCOALA DOCTORALĂ DE ŞTIINŢE INGINEREŞTI
Domeniul: Inginerie Electrică

TEZĂ DE DOCTORAT

<<REZUMAT>>

Contribuţii privind modelarea și optimizarea performanțelor energetice ale unui mare consumator industrial

CONDUCĂTOR ŞTIINŢIFIC:
Prof.univ.dr. ing. Horia Leonard ANDREI

DOCTORAND:
Gabriel OPREA

TÂRGOVIŞTE
2016

CUPRINS

Mulțumiri 3

Introducere 4

Cuvinte cheie 5

Capitolul I: **Regimuri electroenergetice și mărimi caracteristice** 6

1.1. Mărimile caracteristice ale sistemului electroenergetic 6

1.2. Armonicile 7

1.3. Factorul de putere 9

Capitolul II: **Sisteme de măsurare, achiziție și prelucrare a parametrilor electrici ai unui mare consumator industrial** 10

2.1. Sistemul de alimentare cu energie electrică al consumatorului industrial analizat 10

2.2. Alinierea consumatorului industrial la standardele energetice specifice 15

2.2.1. Reglementările standardului EN 50160 privind caracteristicile tensiunii în reţelele de distribuţie 16

2.2.2. Reglementările privind compatibilitatea electromagnetică ale standardelor internaţionale specifice consumatorului industrial 17

Capitolul III: **Algoritmi numerici de modelare a caracteristicilor unui mare consumator industrial** 19

3.1. Modelarea polinomială a caracteristicii *U(I)* a consumatorului industrial. 19

3.2. Concluziile finale ale modelarii celor șapte intervale 23

Capitolul IV: **Metode de optimizare a consumurilor energetice ale unui mare consumator consumator industrial** 24

4.1. Eficiență energetică industrială 24

4.2. Compensarea factorului de putere 24

4.3. Filtrarea armonicilor de curent 25

4.4. Optimizarea consumului energetic al consumatorului industrial 25

4.4.1. Verificarea performanțelor obținute după montarea filtrului. 26

4.4.2. Compararea modelelor matematice ale consumatorului înainte și după după instalarea filtrului 29

4.4.3. Calculul economico-finaciar pentru soluția de compesare implementată 32

Capitolul V: **Contribuții originale și concluzii** 33

Bibliografie 35

Mulţumiri

O dată cu finalizarea acestei etape din viața mea, doresc să adresez câteva cuvinte de mulțumire celor care m-au îndrumat sau mi-au acordat suportul pe parcursul acestei lucrări de doctorat.

Programul de doctorat s-a desfăşurat sub conducerea domnului Prof. Univ. Dr. Ing. Horia Leonard ANDREI, care în calitate de conducător de doctorat mi-a oferit sprijin şi m-a îndrumat în parcurgerea etapelor de cercetare care au dus la atingerea scopurilor propuse, prin selectarea literaturii de specialitate, sugestii şi observaţii privind realizarea referatelor din cadrul doctoratului, scrierea şi publicarea lucrărilor ştiinţifice. Pentru toate acestea doresc să-i aduc calde mulţumiri.

În continuare, doresc să îmi exprim mulțumirea față de membrii comisiei de îndrumare a lucrării pentru sfaturile și sugestiile oferite și anume domnului Prof. Univ. Dr. Ing Dinu COLŢUC, domnului Prof. Univ. Dr. Ing Nicolae VASILE şi domnului Prof. Univ. Dr. Ing Valentin DOGARU-ULIERU.

Respectuoase multumiri membrilor comisiei de doctorat domnii Prof.Univ.Dr.Ing. Costin CEPISCA si Prof.Univ.Dr.Ing. Sorin Dan GRIGORESCU care au analizat cu atentie teza de doctorat si mi-au trimis comentarii extrem de utile pentru imbunatatirea tezei.

Nu în ultimul rând, recunoştinţa mea se îndreaptă spre familia mea care a dat dovadă de înţelegere, suport şi dragoste în timpul desfăşurării programului doctoral dar și către colegii de serviciu care m-au ajutat și m-au înțeles pe durata celor trei ani de cercetare.

Târgovişte 2016

Introducere

Această lucrare tratează în detaliu analiza, modelarea şi optimizarea performanţelor energetice ale unui mare consumator industrial conectat la sistemul electroenergetic național.

Subiectul lucrării este unul extrem de important în condițiile actuale când, la nivel global se pune foarte mult accentul pe economisirea resurselor si pe dezvoltarea durabilă a afacerilor.

În primul capitol sunt prezentate aspectele teoretice legate de mărimile caracteristice ale sistemului electroenergetic, analizându-se regimurile de funcționare specifice unui consumator industrial. S-a făcut referire în special la regimurile de funcționare nesimetrice, punându-se accentul pe factorii care influențează aceste regimuri.

În cel de-al doilea capitol s-au analizat sistemele de măsurare, achiziţii şi prelucrare ale parametrilor electrici specifici unui consumator industrial. În prima parte au fost analizate componentele unui sistem de alimetare specific unui consumator industrial iar în cea de-a doua parte s-a analizat modalitatea de analiză a performațelor energetice actuale ale consumatorului industrial, prezentând inclusiv echipamentul de achiziție de date utilizat la monitorizarea consumatorului. Consumatorul industrial analizat este o fabrică de produse alimentare a companiei Unilever, fabrica amplasată în orașul Ploiești. Capitolul se încheie cu o analiză riguroasă a parametrilor măsurați și cu compararea consumatorului din punct de vedere al compatibilității electromagnetice cu principalele standardele naţionale şi internaţionale privind limitele admisibile ale regimului nesinusoidal al reţelelor electrice.

După o monitorizare de aproximativ 20 de ore a consumatorului industrial, în cel de-al 3-lea capitol sunt dezvoltate și analizate modele matematice pentru diferite regimuri de fucționare cuprinse în perioada de monitorizare. Din cele 20 de ore s-au identificat 7 intervale a câte 15 minute, intervale definite ca fiind sugestive pentru a acoperi toate regimurile de funcționare ale consumatorului, specifice procesului tehnologic al acestuia. Din datele măsurate și folosind regresia polinomială, pentru cele 7 intervale identificate s-au dezvoltat modele matematice pentru determinarea cât mai precisă a caracteristicii *U(I).*

În cel de-al 4-lea capitol se analizează metodele de optimizare ale consumurilor energetice pentru consumatorul industrial. Sunt detaliate din punct de vedere teoretic principalele medode de îmbunătățire al consumului energetic și anume compensarea factorului de putere prin reducerea consumului de putere reactivă și metodele de filtrare ale armonicilor

de curent. Sunt prezentate aspectele teoretice şi apoi sunt analizate folosirea filtrelor pasive şi active precum și a bateriilor de condensatoare.

În urma acestor analize s-a ales folosirea a două filtre active montate în paralel, filtre care vor atenua spectrul armonic și vor îmbunătăți factorul de putere. Măsurătorile şi noile modele matematice ale consumatorului cu filtru activ, comparativ cu cele ale consumatorului fără filtru, confirmă cercetarea anterioră și demonstrează în mod evident eficacitatea soluției implementate.

Pentru a dovedi eficiența investiției, la finalul capitolului este elaborat un calcul economico-financiar, care pune în balanță economiile realizate prin optimizarea consumului energetic cu valoarea investiei, calcul care dovedește în mod clar rentabilitatea acestei investiții.

Contribuțiile originale și concluziile sunt prezentate în capitolul 5.

În încheiere este prezentată bibliografia care a fost studiată pentru elaborarea acestei lucrări.

Cuvinte cheie

- Consumator industrial
- Calitate
- Armonica
- Factor de putere
- Putere reactivă
- Putere activă
- Regim nesinusoidal
- Indicatori de performanță
- Forme de undă
- Standard electric
- Modelare
- Regresie polinomială
- Echipament de măsură
- Achiziție de date
- Compensare
- Filtru
- Optimizare
- Tensiune electrică
- Curent electric
- Analiză

CAPITOLUL I
REGIMURI ELECTROENERGETICE ȘI MĂRIMI CARACTERISTICE

Sistemul electroenergetic reprezintă, poate, cea mai complexă realizare a umanității, reprezentând o vastă rețea de distribuție, specifică fiecărui continent, zonă și țară în parte. Un sistem electroenergetic (SEE) are rolul de a converti sursele de energie în energie electrică și de a transporta această energie în zonele de consum precum și de a o distribui la consumatori. Avantajul utilizării energiei electrice rezultă din faptul că aceasta poate fi transportată pe distanţe mari şi controlată uşor cu un grad mare de eficienţă şi fiabilitate[1].

În vederea exploatării optime, studiul și cunoașterea regimurilor de funcționare sunt foarte importante, constituind principalii piloni în cadrul analizei sistemului electroenergetic.

Un regim al sistemului electroenergetic reprezintă o stare oarecare a sistemului electroenergetic, determinată de valorile principalilor parametrii: putere, tensiune, curent și frecvență, care caracterizează procesul de transformare, transport și distribuție a energiei electrice.

1.1. Mărimile caracteristice ale sistemului electroenergetic

Pe piața de energie electrică, regimurile optime de funcţionare trebuie realizate în cel mai eficient mod, ajutând astfel la menținerea de prețuri cât mai reduse pentru energia electrică livrată clienților și consumatorilor

Pentru exploatarea optimă a sistemului electroenergetic național trebuie urmărită în principal, realizarea unei eficienţe economice maxime, respectând în același timp și limitările privind siguranţa și calitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor. Impunerile de restricţii de siguranţă şi calitate sunt determinate de calcule tehnico-economice, normative de proiectare și de exploatare ale sistemului electroenergetic, precum și de reglementări ANRE (Autoritatea Natională de Reglementare în Energie).

Calitatea energiei electrice este definită de principalii parametrii care intervin în condiționarea de utilizare a energiei electrice [2].

Prin asigurarea calităţii energiei electrice se înțelege menținerea tuturor parametrilor energiei electrice în limite agreate. Nivelul calitativ al energiei electrice într-un nod al sistemului electroenergetic poate fi clasificat în funcţie de:

- calitatea tensiunii,
- valoarea abateri tesiunii față de cea impusă;

- calitatea frecvenţei,
- valoarea abateri frecvenței față de cea setată;
- nivelul de simetrie al sistemului trifazat (curent/tensiune);
- deviația de la forma sinusoidă a curbelor de tensiune și curent;
- calitatea alimentării cu energie electrică [3].

Procesele tehnologice moderne ale consumatorilor pot fi derulate în mod eficient numai în condiţiile unui sistem energetic capabil de a asigura calitatea corespunzătoare a energiei electrice furnizate, de a putea prelua o serie de perturbații introduse în reţeaua electrică de alimentare de instalaţiile electrice şi de a asigura eventualele creşteri ale cererii de energie electrică [4].

1.2. Armonicile

Armonicele sunt forme de undă cu frecvența multiplu întreg al frecvenței fundamentale fiind generate îndeosebi de sarcini neliniare în rețea.

Regimurile deformante de funcţionare ale sistemului electroenergetic sunt regimurile în care formele de undă ale tensiunii, sunt periodice, însă minim una dintre ele, are o altă variație decât cea de tip sinusoidal [5].

Odată determinate amplitudinile şi rangul armonicilor, curba de origine deformată se va calcula prin însumarea punct cu punct a armonicilor componente.

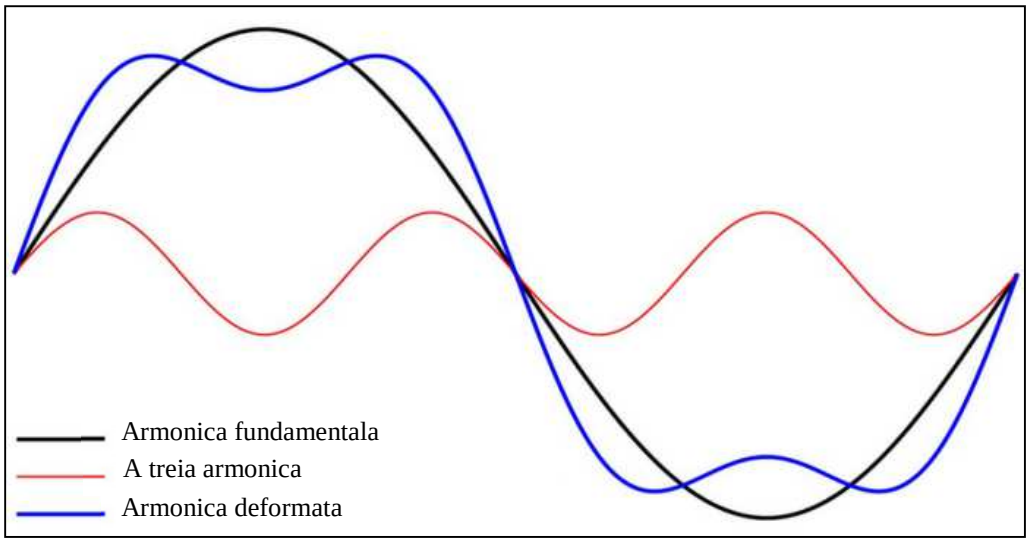


Fig. 1.1. Curbă de origine deformată [6]

În Fig. 1.1 curba de culoare albastră este obţinută din însumarea celor două componente, cea fundamentala (curba de culoare roșie) și armonica de rang 3 (curba de culoare albastră).

În sens invers, descompunerea curbelor deformate pe componentele armonice și fundamentala se realizează folosind ***analiza Fourier.***

În prezent, ca și indicatori de calitate pentru regimului periodic nesinusoidal sunt determinați următorii parametrii [7]:

Valoarea efectivă Y pentru mărimie nesinusoidale:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2} y^2\,dt} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} Y_k^2} \tag{1.1}$$

unde:

T reprezintă perioada curbei deformate;

Y_k este valoarea efectivă pentru componenta de ordinul *k* determinată de analiza Fourier.

Factorul de distorsiune total (THD - Total Harmonic Distorsion) reprezintă raportul dintre valoarea efectivă a armonicilor și valoarea efectivă a fundamentalei:

$$\delta = THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left(\frac{Y_k}{Y_1}\right)^2} \tag{1.2}$$

unde:

Y_k reprezintă amplitudinea armonici de rangul k;

Y_1 reprezintă amplitudinea armonicii fundamentale.

Factorul de distorsiune armonică parțial ponderată (PWDH – Partial Weighted Harmonic Distorsion):

$$\delta_{IP} = PWDH = \sqrt{\sum_{14}^{40} k\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \tag{1.3}$$

unde:

I_k reprezintă curenții armonici de rangul k;

I_1 reprezintă curentul armonic al fundamentalei.

Nivelul armonicii, este raportul dintre valoarea efectivă a armonicii respective și valoarea efectivă a fundamentalei:

$$\gamma_{kI}[\%] = \frac{I_k}{I_1} 100[\%] \tag{1.4}$$

În analiza curbelor deformate de curent electric se consideră că intervalele în care curentul absorbit este redus, să nu fie luate în considerare în analiza statistică a factorului de distorsiune şi a nivelului armonicii. În general, pentru analiza statică a THD-ului, pentru curbele deformate de curentul electric sunt eliminate curbele în care curentul absorbit este sub 20% din valoarea sa normală [7].

1.3. Factorul de putere

Factorul de putere este definit ca un parametru de măsură a capacităţii unui circuit electric alternativ de a furniza sau absorbi putere activă.

Acest parametru este foarte important în evaluarea pierderilor de putere din sistemul electroenergetic, în ambele sensuri, adică atât din partea sursei, cât și din partea consumatorului, fiind urmărit de majoritatea sistemelor specifice consumatorilor industriali [8]. Valoarea factorului de putere este limitată de cerințele contractuale încheiate între furnizor şi consumator.

În sistemele electroenergetice unde mărimile variază periodic, s-au definit două relații de calcul ale factorului de putere [9]:

- Prima definiție este dată de raportul dintre puterea activă și puterea aparentă:

$$PF^{def} = \frac{P_{tot}}{U_{ef} I_{ef}} \tag{1.5}$$

- A doua definiţie pentru factorul de putere se referă la raportul dintre puterea activă și puterea aparentă pe fundamentală; factorul de putere calculat aslfel poartă numele de defazaj:

$$DF = \cos\theta_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \tag{1.6}$$

În cazul regimurilor sinusoidale cele două rapoarte sunt egale. Pentru un regim cât de cât apropiat de cel sinusoidal se poate scrie:

$$PF = \frac{DF}{\sqrt{1 + THD^2}} \tag{1.7}$$

unde,THD este factorul de distorsiune normal (1.3).

CAPITOLUL II
SISTEME DE MĂSURARE, ACHIZIȚIE ȘI PRELUCRARE A PARAMETRILOR ELECTRICI AI UNUI MARE CONSUMATOR INDUSTRIAL

În România 50% din cantitatea de energie electrică produsă este livrată consumatorilor industriali. În aceste condiții este foarte important, ca atunci când este proiectată o fabrică, să se țină cont, în mod special, pe lânga puterea maximă instalată și de raportul dintre puterea activă și puterea reactivă a receptoarelor care vor fi instalate, pentru a se evita supra sau subdimensionarea instalaţiilor de alimentare.

În urma valorilor calculate precum şi în urma examinării situaţiei sistemului electroenergetic din zona în care va fi amplasată fabrica, se stabilesc mai multe scenarii privind atât instlaţiile de racordare la sistem, cât şi pentru reţeaua internă de distribuţie a energiei electrice, după care, în funcție de raportul eficiență/preț se selectează varianta cea mai avantajoasă, care urmează a fi realizată [10].

2.1. Sistemul de alimentare cu energie electrică al consumatorului industrial analizat

Obiectivul acestei lucrării îl reprezintă analiza soluţiilor de alimentare, precum și îmbunătățirea performantelor energetice ale unui mare consumator industrial având ca obiectiv modelarea și optimizarea performanţelor energetice în vederea realizării unui algoritm de funcționare pentru acest consumator. Consumatorul analizat este o fabrică de produse alimentare din Ploiești, fabrică ce face parte din compania multinațională Unilever [11].

Consumatorul industrial ales pentru lucrarea de față este alimentat din SEN (Sistemul energetic național) dintr-un punct de distribuție cu tensiunea de 20 kV, având puterea instalată a postului trafo de 2 MVA cu o putere medie absorbită de 1,5 MVA.

Schema de distribuție este o schemă mixtă care include atât scheme radiale cât și scheme cu linii principale și magistrale. Din postul trafo pleacă 4 linii magistrale către tablourile generale de distribuție (TGD), aflate în diferite zone din fabrică. Cele 4 TGD-uri sunt dimensionate diferit din punct de vedere al puterii instalate, în funcție de natura și puterea receptorilor pe care-i deservesc.

Principalii consumatori de energie electrică ai fabricii sunt:

- motoare electrice asincrone cu puteri de până la 80 kW;
- cuptoare electrice cu puteri de până la 30 kW;
- compresoare de aer comprimat cu puteri de până la 100 kW;

- compresoare de amoniac cu puteri de până la 150 kW
- iluminat cu lămpi fluorescente, LED, etc.
- grupuri de climatizare cu puteri de până la 150 kW.

Nivelul de automatizare al fabricii este crescut, utilizându-se la scară mare aplicații cu semiconductoare de putere, cum ar fi convertizoarele de frecvență, sursele în comutație, etc.

Pentru monitorizarea parametrilor electroenergetici ai consumatorului industrial, s-a folosit un aparat de măsură profesional, care este practic un Analizor de Calitate a energiei electrice de la Fluke Seria 430 (Fig. 2.1)

Fig. 2.1. Analizorul de calitate de la Fluke Seria 430

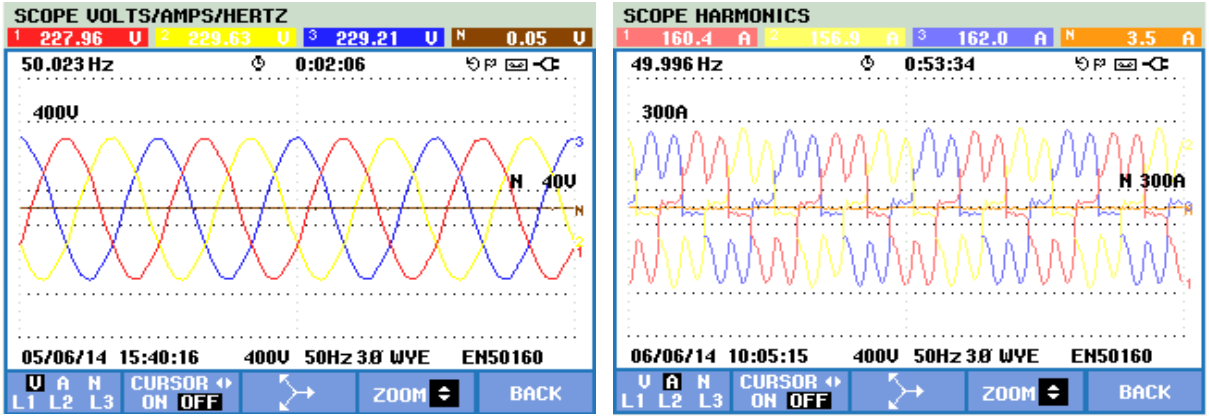
Conform schemei de distribuție din s-a realizat câte un set de măsurători pentru 2 puncte diferite ale magistralei:

- **punctul** 1, măsurarea parametrilor la plecarea către TGD4 care are puterea instalată de 1MVA, magistrală care are ca principali consumatori un sistem de refrigerare cu compresoare de amoniac, cu două grupuri a câte 150kW fiecare, un compresor de aer cu puterea de 100kW și alți consumatori auxiliari însumând 100kw.
- **punctul 2**, măsurarea parametrilor la plecarea către TGD1 care are puterea instalată de 0,4 MVA, magistrală care are ca principali consumatori, utilaje de preparare a margarinei cu motoare de până la 85 kW

Măsurători în punctul 1

Forme de undă și armonici

- fundamentalele tensiunilor (a) și curenților (b) (Fig. 2.2).



a). b).

Fig. 2.2. Forma de undă a tensiuni și curentului

- forma de undă curent și tensiune pentru faza L1 - (Fig. 2.3)

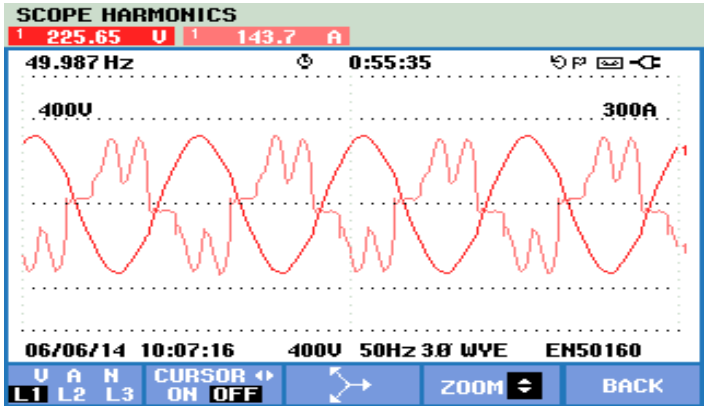
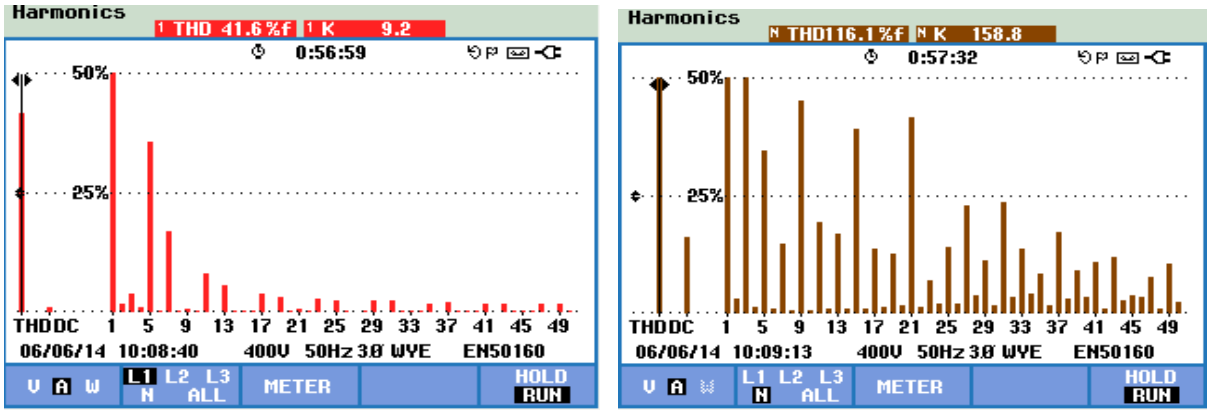


Fig. 2.3. Forma de undă a tensiuni și curentului de fază

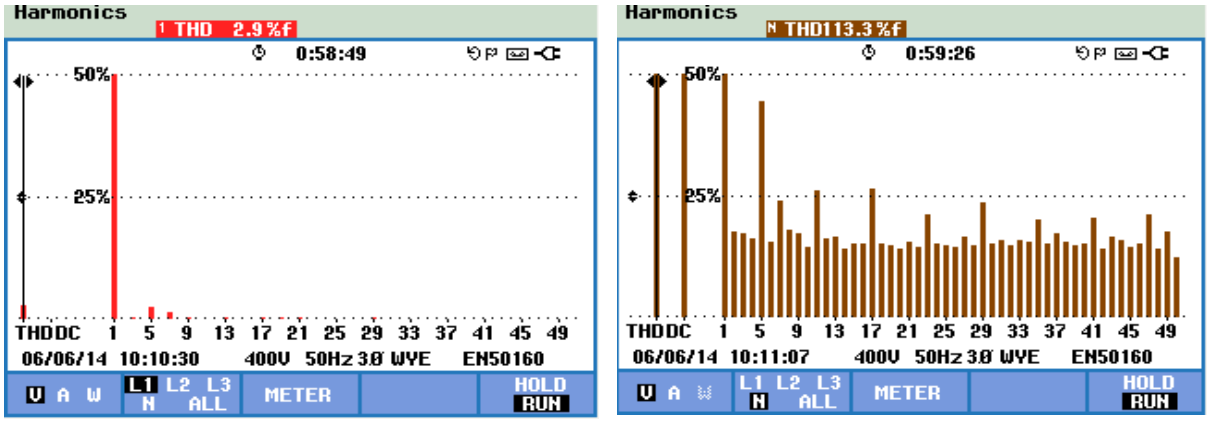
- spectru de armonici pentru curentul pe L1 (a) și a curentului de nul (b) (Fig. 2.4).



a). b).

Fig. 2.4. Spectrul armonicilor de curent

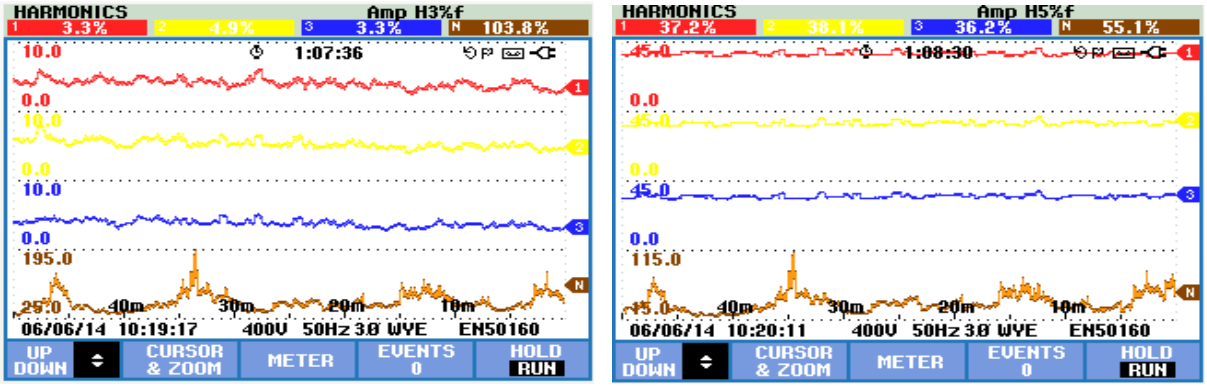
- spectru de armonici pentru tensiunea pe L1 (a) și nul (b) (Fig. 2.5).



a). b).

Fig. 2.5. Spectrul armonicilor de tensiune

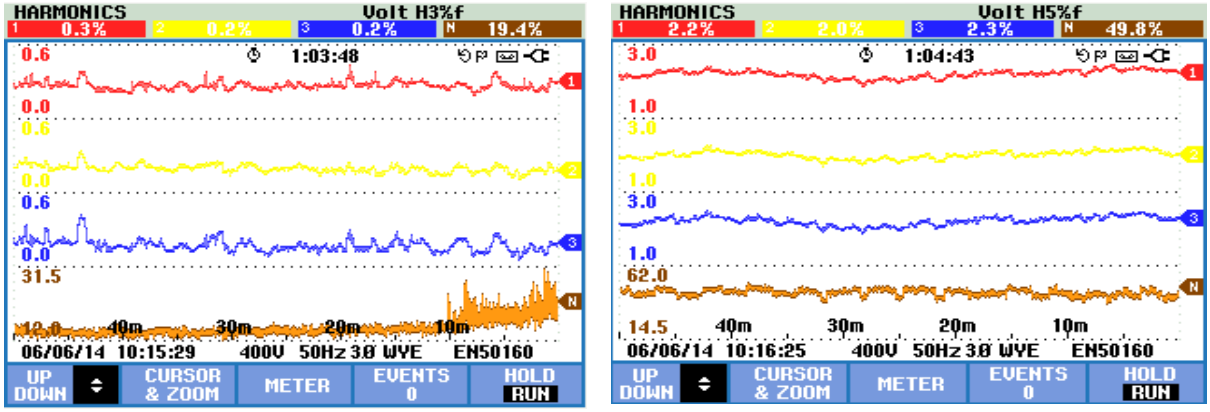
- evoluția armonicilor de rangul 3 (a) și rang 5 (b) pentru curenții pe o perioadă de timp de 40min (Fig. 2.6).



a). b).

Fig. 2.6. Evoluția armonicilor de curent

- evoluția armonicilor de rangul 3 (a) și rang 5 (b) pentru tensiuni pe o perioadă de timp de 40min (Fig. 2.7).



a). b).

Fig. 2.7. Evoluția armonicilor de tensiune

Pentru magistrala analizată, din punctul de vedere al nesimetriei datorate armonicilor, calitatea tensiunii este net superioară față de calitatea curentului pe care îl absoarbe pe cele trei faze plus nulul de lucru [11].

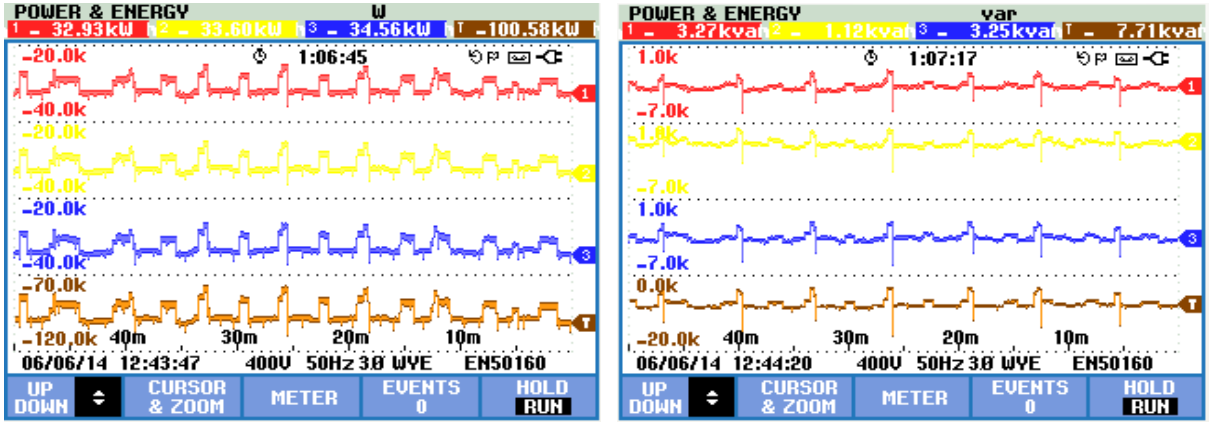
Forma de undă a curentului este distorsionată datorită armonicilor de rang superior, care au valori destul de mari.

THD tensiune (Total Harmonic Distorsion) este în medie de 2,9% pentru fiecare fază, iar THD curent este în medie de 46,6%

Puteri și factor de putere

De menționat, că la măsurarea puterii, senzorii de curent au fost montați în anti fază valorile înregistrate se vor lua în modul.

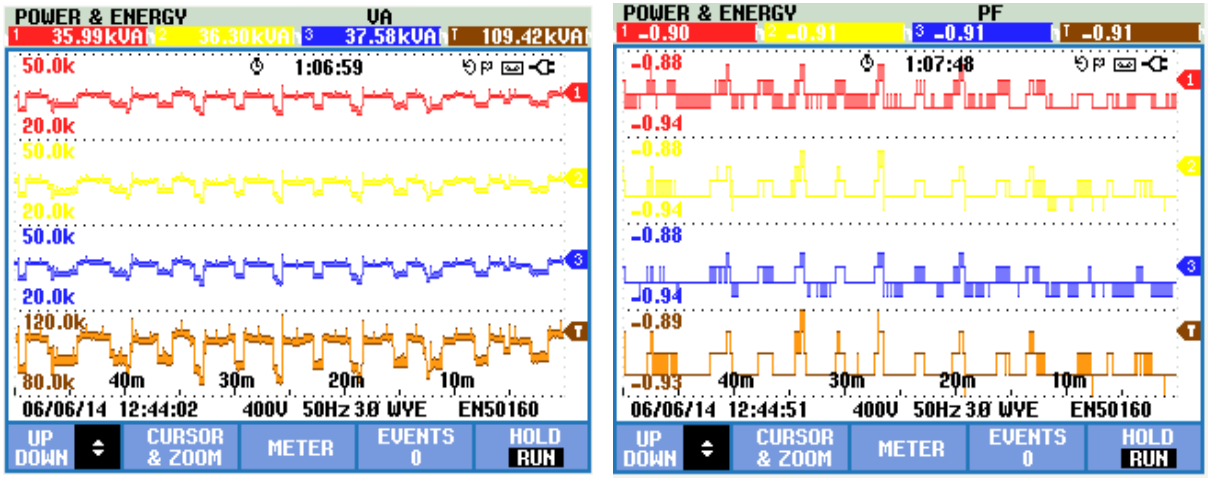
- evoluția puterii active (a) și reactive (b) absorbite într-un interval de timp Fig. 2.8.



a). b).

Fig. 2.8. Evoluția puterilor active și reactive

- evoluția puterii aparente (a) și a factorului de putere (b) măsurate într-un interval de timp (Fig. 2.9).



a). b).

Fig. 2.9. Evoluția puterii aparente și a factorului de putere

Analiza din punct de vedere al variației puterilor absorbite de către receptorii conectați, conduce la concluzia că pe această magistrală puterea variază destul de mult, din cauza conectărilor și deconectărilor multiple de receptori importanți din punct de vedere al puterii consumate.

S-au înregistrat variații de putere reactivă între 1kVAR și 7kVAR pe durata a 40 de minute de monitorizare, în această perioadă factorul de putere variind proporțional între 0,88 și 0,94. Din punct de vedere al încărcării, puterea este uniform distribuită pe cele trei faze ale sistemului.

Concluzii generale ale măsuratorilor

Conform schemei de distribuție a consumatorului, puterea instalată a fiecarei magistrale este mult mai mare decât puterile înregistrate pe perioada măsurătorilor, nefiind vorba despre o supradimensionare a sistemului, ci de faptul că măsurătorile au fost efectuate într-o perioadă în care consumatorul industrial nu funcționa la capacitatea maximă [11].

2.2. Alinierea consumatorului industrial la standardele energetice specifice

În România, și nu numai, menținerea calitații energiei electrice este responsabilitatea furnizorului dar și a consumatorului, acesta din urmă având obligația de a se încadra in limitele perturbațiilor impuse de standardele în vigoare.

La nivel mondial există mai multe organizații și instituții care elaborează și stabilesc norme tehnice. Cele mai importate astfel de organisme sunt:

- ISO – Organizația Internațională de Standardizare (International Standard Organization).
- CEN – Comitetul European pentru Standardizare (Comite Europeen de Normalisation).
- ASRO - Institutul Român de Standardizare care activează în domeniul electric prin intermediul ANRE – Autoritatea Naţională de Reglementare Energetică. Aceasta este o instituție națională.

Pentru a compara performanțele consumatorului cu cerințele standardelor în vigoare monitorizarea și analiza parametrilor, se va face în detaliu pentru magistrala cu cel mai mare regim de nesimetrie și anume pe magistrala numărul patru aferentă TGD4 (Fig. 2.10).

Pentru o cât mai bună interpretare a datelor și a caracteristicilor consumatorului studiat, monitorizarea și achiziția datelor s-au făcut pe durata a 20 de ore, timp în care, consumatorul a avut mai multe regimuri de funcționare.

Sistemul de achiziție și analiză a datelor este compus din aparatul de masură Fluke descris anterior și un program de interpretare și modelare a datelor, ”*Power Log*” dezvoltat, de asemenea de Fluke.

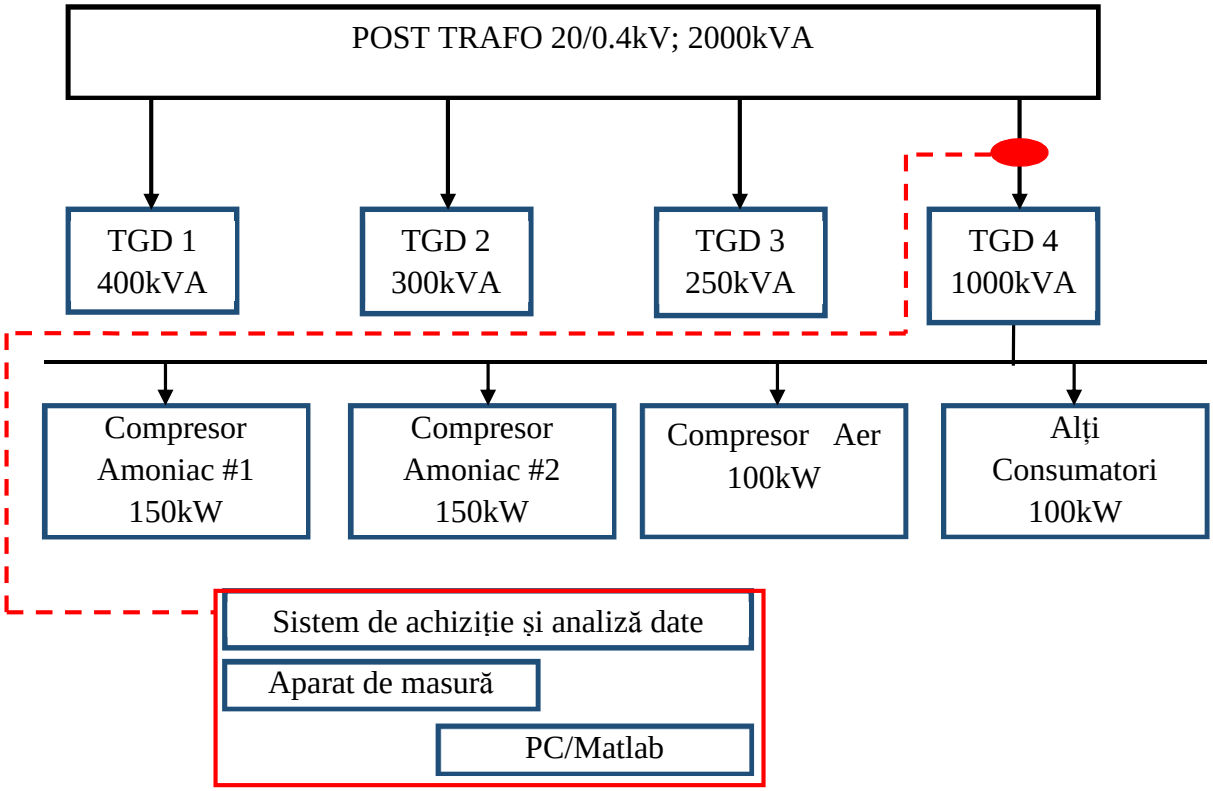


Fig. 2.10. Schema bloc de distribuție a consumatorului industrial

Apartul permite conectarea la calculator printr-o interfață USB (Magistrală Serială Universală) și cu ajutorul programului propiu → Power Log, toți parametri înregistrați sunt transferați într-o bază de date.

Cu baza de date creată, programul Power Log poate afișa sub foarte multe forme parametrii înregistrați, putând creea grafice sub diferite forme și exporta rapoarte în format “excel” (.xls) [12].

2.2.1. Reglementările standardului EN 50160 privind caracteristicile tensiunii în reţelele de distribuţie

Standardul EN 50160 [13] face referire la parametri tensiunii precum și la abaterea admisibilă în punctul de conexiune dintre consumator și rețeaua națională de distribuție. Standardul face referire la joasă tensiune (JT), cu valoarea maximă a tensiunii de linie de 1000 V iar medie tensiune (MT) cu o valoare maximă a tensiunii de linie de 35 kV, toate acestea în condiţii normale de funcţionare [14].

În Tabelul 2.1 sunt comparate valorile măsurate cu limitele și valorile impuse de catre standardul EN 50160.

Tabelul 2.1. Compararea parametrilor măsurați cu limitele impuse.

Tipul parametrului monitorizat	**Limite acceptabile**	**Valoarea măsurată**	**Observații**
Variaţii ale tensiunii	380 V± 10%	Valoare min. = 378 V Valoare max = 396 V	**În limitele impuse**
Frecvenţa tensiunii	49,5 Hz - 50,5 Hz	Valoare min. = 49,89 Hz Valoare max = 50,07 Hz	**În limitele impuse**
Nesimetrie	în general 2 %, ocazional 3 %	Aprox. 0%	**În limitele impuse**
THD_U	< 8 %	Valoare max. = 5,13 %	**În limitele impuse**

2.2.2. Reglementările privind compatibilitatea electromagnetică ale standardelor internaţionale specifice consumatorului industrial

Reglementările referitoare la regimul deformant ale standardului IEC 61000-3-4

Standardul IEC 61000-3-4:2007 [15] tratează limitele emisiilor armonice de curent în reţelele de distribuţie de joasă tensiune pentru echipamentele cu un curent nominal mai mare de 16 A.

În Tabelul 2.2 sunt comparate valorile măsurate cu limitele și valorile impuse de catre standardul IEC 61000-3-4:2007 specifice consumatorului industrial.

Tabelul 2.2. Evaluarea parametrilor conform standardului IEC 61000-3-4:2007.

Tipul parametrului monitorizat	**Limite acceptabile**	**Valoarea măsurată**	**Observații**
THD_I	< 16 %	Valoare max. = 14,2 %	**În limitele impuse**
Armonica de ordinul 3	< 21,6 %	Valoare max. = 0,5 %	**În limitele impuse**
Armonica de ordinul 5	< 10,7 %	Valoare max. = 4,8 %	**În limitele impuse**
Armonica de ordinul 7	< 7,2 %	Valoare max. = 2 %	**În limitele impuse**
Armonica de ordinul 9	< 3,8%	Valoare max. = 0,2 %	**În limitele impuse**
Armonica de ordinul 11	< 3,1%	Valoare max. = 4 %	**În afara limitelor impuse**
Armonica de ordinul 13	< 2%	Valoare max. = 2,1 %	**În afara limitelor impuse**

Reglementările referitoare la regimul deformant ale standardului IEC 61000-2-4

Standardul IEC 61000-2-4:2002 [16] tratează perturbaţiile de conducţie de joasă frecvenţă (0-9 kHz), indicând nivelele de compatibilitate ale reţelelor de distribuţie industrială și a celorlate rețele de distribuție a energie electrice (până la 35 kV) excluzând rețele publice.

Pentru efecte pe termen lung, nivelele de compatibilitate pentru armonicile de tensiune și pentru coeficientului total de distorsiune THD sunt date în Tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Nivele de compatibilitate ale standardului IEC 61000-2-4

Tipul parametrului monitorizat	**Clasa 1**	**Clasa 2**	**Clasa 3**	**Valorile măsurate**
THD_U	7,5 %	12 %	15 %	5,13 %
Armonica de ordinul 3	4,5 %	7,5 %	9 %	0 %
Armonica de ordinul 5	4,5 %	9 %	12 %	0 %
Armonica de ordinul 7	4,5 %	7,5 %	10,5 %	0 %
Armonica de ordinul 9	2,25 %	2,2 %	3,75 %	0 %
Armonica de ordinul 11	4,5 %	5,25 %	7,5 %	0 %
Armonica de ordinul 13	4,5 %	4,5 %	6,75 %	0 %

Consumatorul industrial care constituie obiectul de studiu pentru aceasta lucrare este încadrat în clasa a 3-a, din punct de vedere al compatibilității electromagnetice, însă regimul deformant al acestuia este foarte puțin influențat de amplitudinea armonicilor de tensiune, acestea fiind 0% din amplitudinea fundamentalei. În urma evaluarii măsurătorilor și a comparări parametrilor monitorizati cu valorile impuse de standardele și reglementările specifice, se poate concluziona faptul ca regimul deformant al consumatorului industrial este unul moderat care încă mai permite destul de multe îmbunatățiri.

CAPITOLUL III
ALGORITMI NUMERICI DE MODELARE A CARACTERISTICILOR UNUI MARE CONSUMATOR INDUSTRIAL

3.1. Modelarea polinomială a caracteristicii *U(I)* a consumatorului industrial.

Pentru a întelege mai bine felul în care consumatorul industrial studiat se comportă, se va modela caracteristica de funcționare *U(I)* specifică acestui consumator în diverse regimuri de funcționare. Funcția *U(I)* este obținută prin eliminarea variabilei timp din cele două funcții *U(t)* și *I(t)*, specifice consumatorului. Pentru modelarea caracteristicilor marelui consumator industrial analizat in lucrarea de față, funcția de regresie polinomială folosită este „**cftool**”.

Pe durata monitorizări, consumatorul industrial a funcționat în regimuri diferite din punct de vedere al variației de sarcină, cea ce înseamnă utilizarea unor echipamente și fluxuri tehnologice diferite. După ce toate datele au fost achiziționate și analizate, au fost identificate și alese 7 intervale diferite de 15 minute fiecare, pentru a fi analizate și modelate. Aceste intervale sunt încadrate din punct de vedere al variabilei timp în Fig. 3.1.

Consumatorii pentru fiecare interval sunt enumerați în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Tipurile de consumatori specifice fiecarui interval

Interval	Tipul de consumatori	Observatii despre funcționare
1	2 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Funcționare lină cu cerere mică de energie, la sfârșitul intervalului. Regulatoarele PID nu oferă cea mai bună stabilitate
2	2 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Eliberare de putere controlată de PID pentru sistemul de amoniac
3	4 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Sistemul automatizat de amoniac a decis să pornească încă două motoare
4	4 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Funcționare la mare capacitate. Regulatoarele PID nu oferă cea mai bună stabilitate
5	4 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Proces instabil cu unele opriri ale motorului conectat direct
6	4 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	O caracteristică fără probleme cu un proces foarte stabil dat de PID
7	4 motoare de 50 kW, controlate VSD Un motor de 100 kW controlat VSD Un motor de 35kw conectat direct	Oscilații la cererea de putere a compresorului de aer

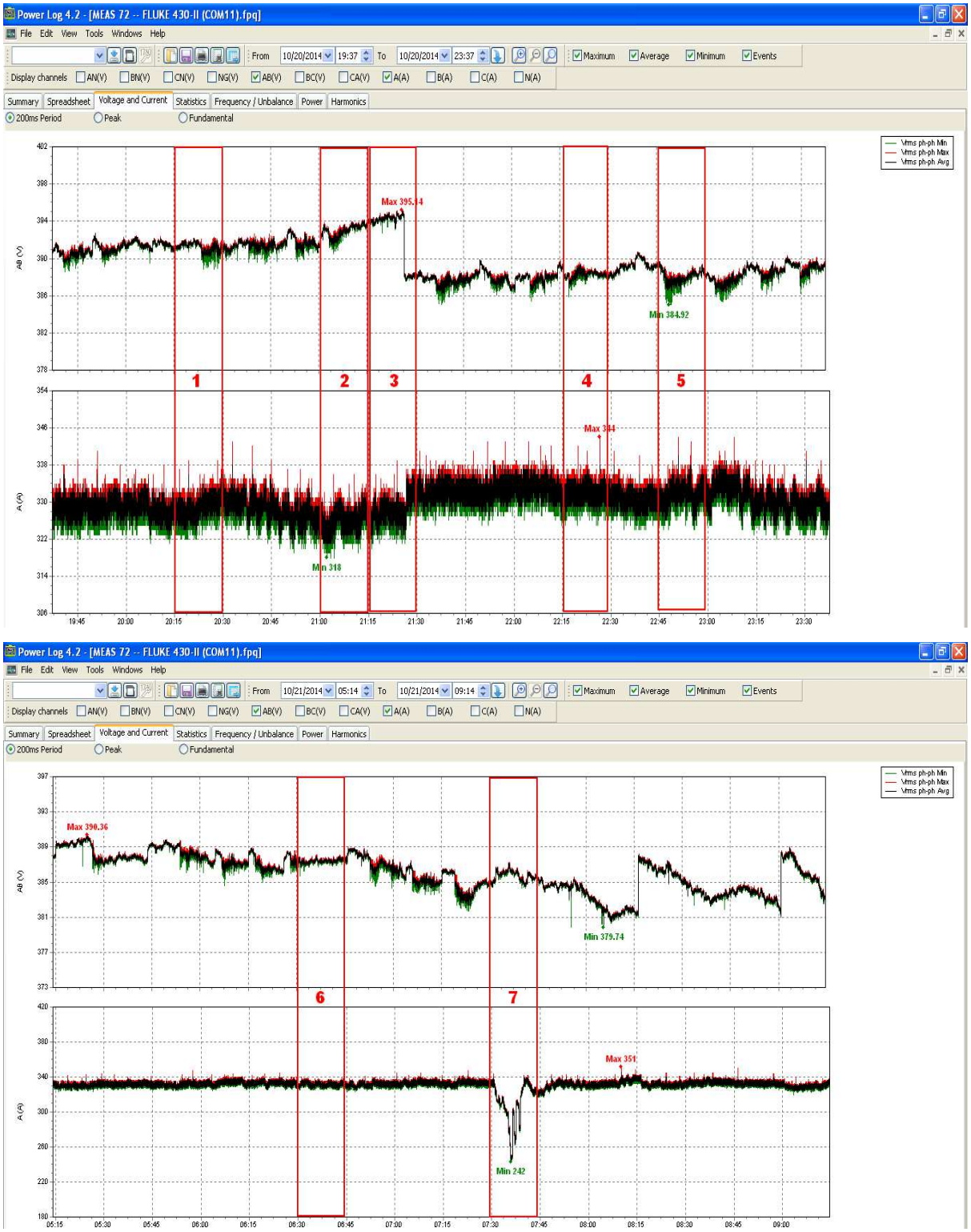


Fig. 3.1. Marcarea intervalelor de analiză

Pe de altă parte, aceste intervale specifice, caracterizează și diversele procese tehnologice ale fabricii, fiecare din ele punându-si amprenta asupra calitații energiei și a eficienței consumului enrgetic.

După cum am menționat mai sus, o funcție polinomială de un ordin cât mai mare nu garantează un rezultat mai bun, de aceea după generarea primelor 7 funcții polinomiale, ele sunt evaluate pentru a determina cea mai potrivită aproximare (“best fit”) [17].

În urma a numeroase studii și analize a rezultat că parametrii statistici care pot fi utilizați pentru a evalua cea mai potrivită formă de undă a unei funcții polinomiale sunt [17] [18] [19]:

- *R-pătrat* (“R-Square”),
- *R-pătrat ajustat* (“ajusted R-Square”),
- *rădăcina medie de eroare la pătrat* (“root mean squared error - RMSE”),
- *suma pătratelor datorate erorii* (“the sum of squares due to error - SSE”).

Modelarea polinomială a intervalului numărul 1

Pentru intervalul numărul 1, așa cum a fost menționat anterior, prin eliminarea variabilei timp din funcția *u(i,t)* s-a obținut funcția *u(i).* Acest lucru a fost posibil deoarece pe durata măsurătorilor, la fiecare perioadă de timp s-au înregistrat simultan valori medii pentru tensiune și curent. Astfel, nefiind vorba de mărimi instantanee, funcția *u(i)* devine *U(I).*

În Fig. 3.2 sunt prezentate valorile respectiv graficul funcției *u(i,t)* care au fost folosite la obținerea funției *U(I).*

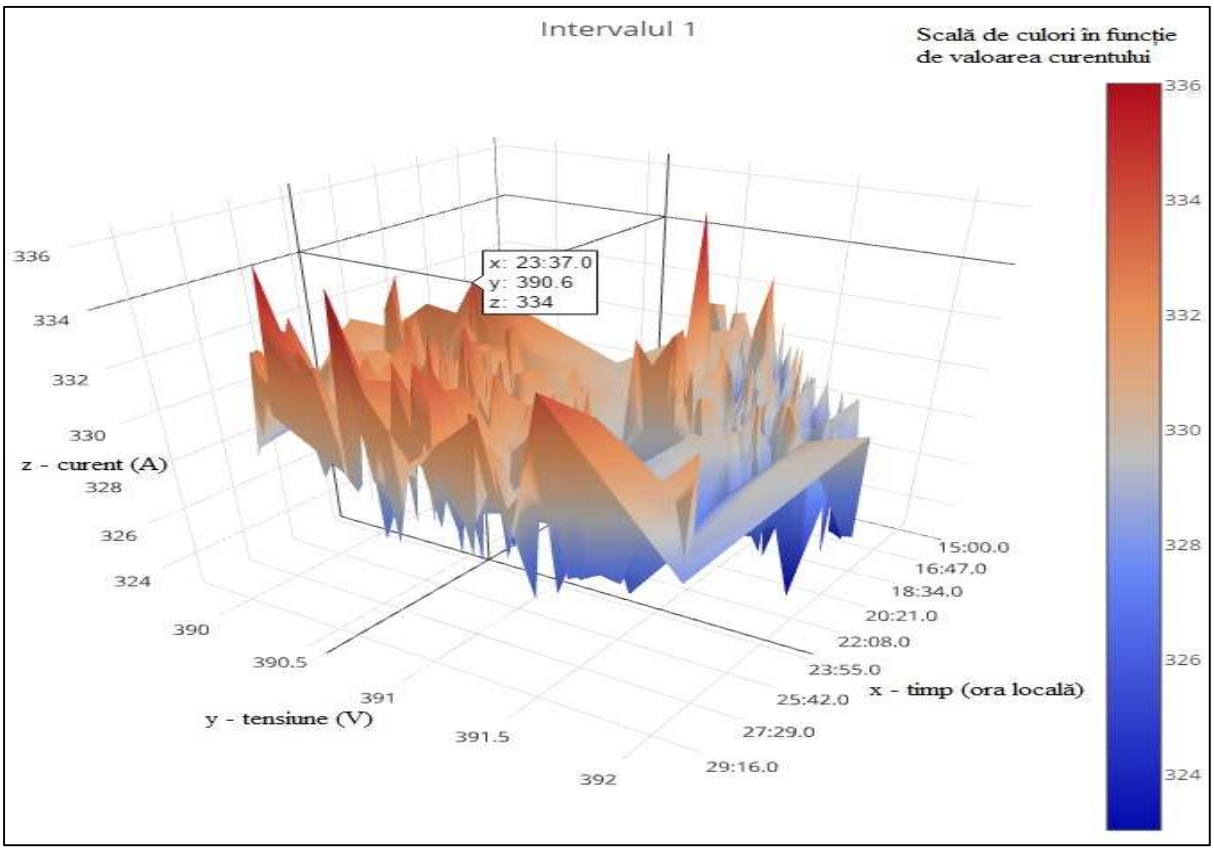


Fig. 3.2. Graficul 3D pentru funcția *u(i,t)* in format “mesh”

Funcția *U(I)* specifică primului interval este reprezentată de punctele care pot fi vizualizate în Fig. 3.3, iar conform legendei, sunt prezentate aproximările polinomiale de la ordinul 1 până la ordinul 7.

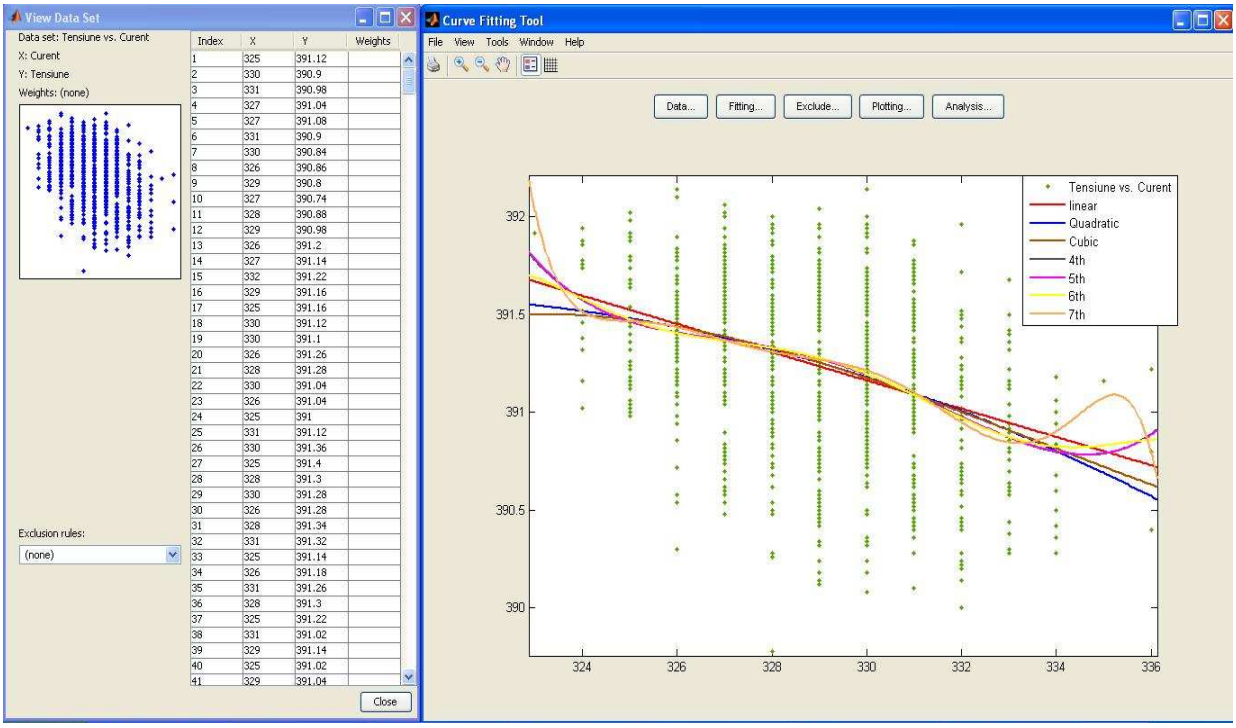


Fig. 3.3. Modelarea caracteristicii *U(I)* pentru intervalul 1

Funcțiile polinomiale de la ordinul 1 până la ordinul 7 sunt descrise în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Funcțiile polinomiale *U(I)* pentru intervalul 1

Funcție	**Grad**
Poly1= − 0,1639x + 391,2	Liniar
Poly2= − 0,01934x^2 – 0,1627x + 391,3	Patratic
Poly3= 0,003314x^3 – 0,02042x^2 – 0,1712x + 391,3	Cubic
Poly4= 0,009054x^4 – 0,003995x^3 – 0,06216x^2 – 0,1563x + 391,3	4
Poly5= − 0,0001467x^5 + 0,009238x^4 − 0,00299x^3 – 0,06282x^2 – 0,1575x + 391,3	5
Poly6= − 0,001076x^6 + 0,001189x^5 + 0,01894x^4 – 0,009659x^3 – 0,08219x^2 – 0,1521x +391,3	6
Poly7= − 0,002933x^7 + 0,002332x^6 + 0,03374x^5 – 0,00446x^4 – 0,1038x^3 – 0,04506x^2 – 0,09102x + 391,3	7

Utilizarea intervalelor de încredere pentru coeficienți, ajută la evaluarea și compararea curbei rezultate. Claritatea acestor coeficienți este stabilită de intervalele de încredere iar atunci când acestea sunt sunt considerabil diferite atunci ele induc incertitudine. Dacă în unele modele apar coeficienți egali cu zero, atunci aceștia nu ajută evaluarea modelării. Pentru această lucrare, un interval de încredere de 95% a fost ales.

Ca și pas următor, pentru fiecare interval în parte, îl constituie evaluarea formelor de undă a funcțiilor polinomiale generate. Acest lucru se face prin evaluarea parametrilor statistici (Tabelul 3.3) de evaluare a formelor de undă polinomiale [20].

Tabelul 3.3. Parametrii statistici pentru modelul intervalului 1

Grad	**Numele funcției**	**SSE**	**R-pătrat**	**RMSE**	**R-pătrat ajustat**
liniar	Poly1	146,3208	0,141817	0,403435	0,140863
pătratic	Poly2	145,7801	0,144989	0,402913	0,143085
cubic	Poly3	145,7455	0,145192	0,403089	0,142333
4	Poly4	145,0744	0,149128	0,402385	0,145329
5	Poly5	145,074	0,14913	0,402609	0,144376
6	Poly6	145,0336	0,149367	0,402778	0,143658
7	Poly7	144,4425	0,152834	0,402181	0,146193

În acest caz, funcția polinomială cea mai potrivită este cea de **grad 7**.

Acest lucru a fost destul de ușor de determinat datorită distribuției Gauss-iene a datelor brute.

3.2. Concluziile finale ale modelarii celor șapte intervale

Chiar și în urma unor astfel de cercetări, soluțiile viitoare nu vor fi simplu de pus în aplicare, așa cum este descris în acestă lucrare, deoarece chiar și un studiu care utilizează programul Matlab poate lăsa posibilitatea de interpretare, pentru că orice set de date primare poate coincide cu aproape orice ecuație polinomială [21]. Studiul devine mult mai eficient și este mult mai valoros dacă se cunoaște în detaliu fiecare consumator în parte și dacă este înțeles modul de interpretare și felul în care fiecare curbă a fost aproximată în cel mai potrivit mod [20].

CAPITOLUL IV
METODE DE OPTIMIZARE A CONSUMURILOR ENERGETICE ALE UNUI MARE CONSUMATOR INDUSTRIAL

4.1 Eficiență energetică industrială

Într-o fabrică, creşterea eficienţei energetice se face prin implementarea tehnicilor şi procedurilor de management al energiei. Pentru eficienţa sau ineficienţa energetică nu există o unitate de măsură specifică, acestea sunt aproximate prin monitorizarea mai multor indicatori de performanţă energetică [22] [23].

Aceaste studiu tratează modalitățile de eficientizare a consumului energetic ale consumatorului industrial menționat în capitolele precedente, consumator care prezintă un regim deformant în sistemul de distribuție al energiei electrice.

Metodele de optimizare ale consumului energetic studiate sunt:

- ***Compensarea factorului de putere***;
- ***Filtrarea armonicilor de curent***.

4.2 Compensarea factorului de putere

Îmbunătățirea factorului de putere contribuie la creșterea randamentului rețelei de distribuție, asigurând o utilizare mai eficientă a liniei de transport prin diminuarea puterii aparente a consumatorului respectiv. Practic odată cu îmbunătățirea factorului de putere, curentul care circulă prin rețeau de distribuție scade, pentru aceeași încărcare a rețelei [24].

Definirea factorului de putere precum și modalitățile de interpretare ale acestuia au constituit materiale de studiu complex în domeniul electrotehnicii și al energeticii. În țara noastră, profesorul universitar Andrei Țugulea a dezvoltat noi criterii de analiză ale factorului de putere, susținând introducerea limitărilor privind nivele admisibile ale factorului de putere [25].

Cea mai simplă definire a factorului de putere, este cea pentru regimul sinusoidal și anume [25]:

$$k = \frac{P}{S} = \frac{UIcos\varphi}{UI} \tag{4.1}$$

Incluzând în relație și puterea reactivă factorul de putere devine:

$$k_p = cos\varphi = \pm\sqrt{1 - sin^2\varphi} = \pm\sqrt{1 - \frac{Q^2}{S^2}} \tag{4.2}$$

Din punct de vedere matematic cele două relații sunt identice, însă din punct de vedere fizic fiecare din ele conferă mai multe semnificații ale factorului de putere.

În mod general factorul de putere se poate defini [25]:

$$k_p = \sqrt{1 - \frac{Q^2 + D^2}{S^2}} \tag{4.3}$$

4.3 Filtrarea armonicilor de curent

Prin eliminarea pe cât posibil a armonicilor caracteristice unui regim deformant, se eficientizează într-o mare măsură consumul energetic și în aceleași timp se elimină și efectele care au un impact negativ asupra calității energiei electrice [26][27]. Filtrarea armonicilor se referă practic la eliminarea pe cât posibil a tuturor formelor de undă, altele decât fundamentala, prezente în sistemul de distribuție al energiei electrice [28][29]. Principalele echipamente cu care pot fi reduse armonicile sunt transformatoare de izolare, filtre pasive sau filtre active.

4.4 Optimizarea consumului energetic al consumatorului industrial

Consumatorul industrial, după cum a fost menționat și in capitolele precedente [30], este o fabrică de bunuri de larg consum din orașul Ploiești (Fig. 4.1).

Fig. 4.1. Fabrica Unilever din Ploiești

Metoda prin care se încearcă optimizarea consumului energetic se bazează pe compensarea puterii reactive și pe filtrarea armonicilor din sistemul de distribuție al consumatorului.

Obiectul acestei cercetarii il constituie magistrala numărul 4 (Fig. 2.10) a consumatorului, magistrală care, după cum a mai fost specificat, este cea mai importantă din punct de vedere al regimului nesimetric, regim impus de tipul de consumatori conectați la această magistrală [31].

Echipamentul de compensare trebuie dimensionat atât în funcție de nivelul puterii reactive și al armonicilor pe care trebuie să le compenseze, dar și în funcție de sarcina actuală a receptorilor sau chiar de puterea instalată a magistralei respective, aceasta în cazul în care va trebui să deservescă și eventualii noi consumatori alimentați din linia respectivă [32].

În colaborare cu Scheinder Electric, s-au analizat toți acesti parametrii electro-energetici specifici magistralei reațea, aceștia propunând unul din echipamentele de filtrare activă din gama *„AccuSine”*. Pe baza raționamentului din Fig. 4.2, s-a ales ca soluție optimă filtru activ *„AccuSine SWP”* proiectat special pentru consumatorul analizat.

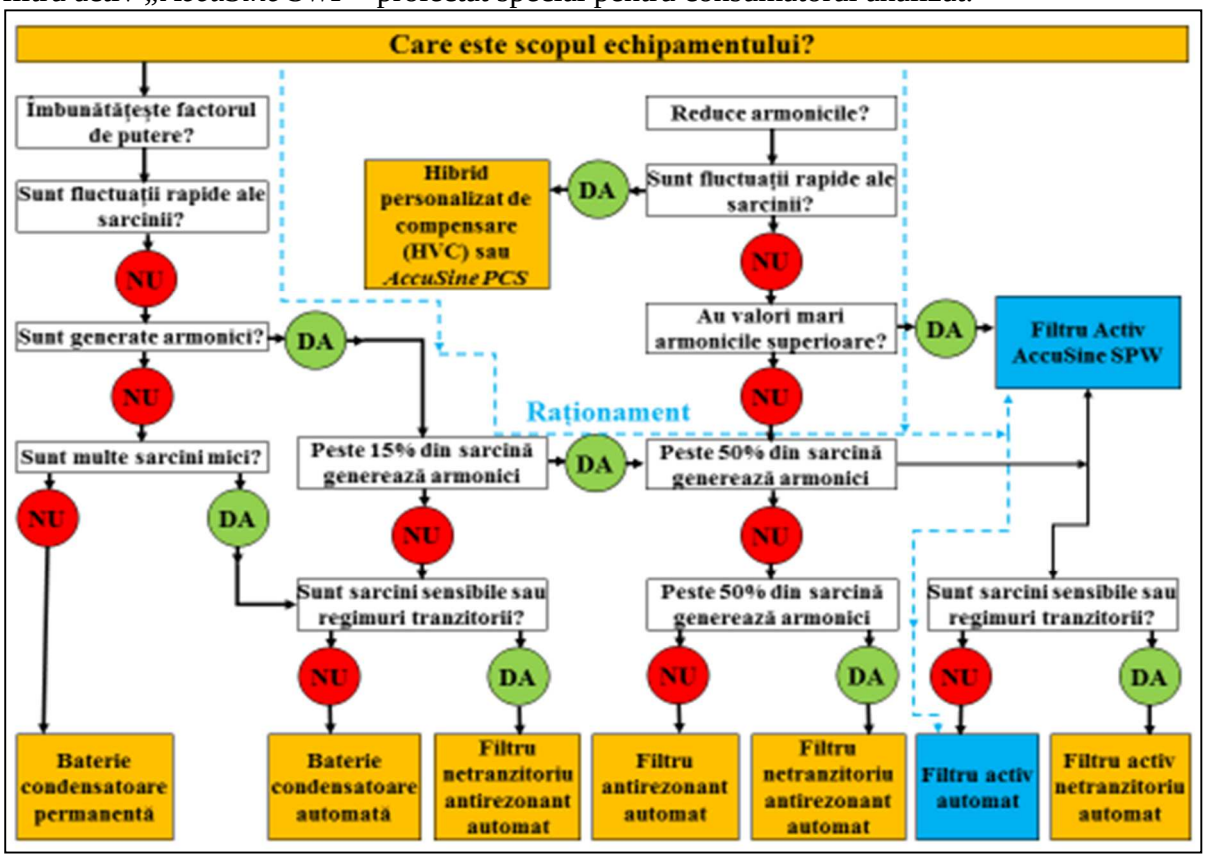


Fig. 4.2. Raționamentul folosit pentru alegerea filtrului

4.4.1 Verificarea performanțelor obținute după montarea filtrului.

Datorită faptului ca majoritatea consumatorilor este formată din motoare trifazate, magistrala monitorizată este una bine echilibrată din punct de vedere al încărcării pe fiecare fază, iar unde este cazul, monitorizarea se face doar pe una din faze [33]-[38].

Pentru a valida rezultatele obținute după instalarea unității de compensare, consumatorul a fost monitorizat pe o perioadă de patru ore înainte de a activa filtrele și patru ore după ce filtrele au fost pornite. Astfel, se va putea face comparații între cele două regimuri de funționare ale consumatorului, cu și fară echipament de compensare.

Caracteristicile principalilor parametri electroenergetici sunt comparate mai jos.

Spectrului armonic al rețelei este redat în Fig. 4.3 în starea inițială și în Fig. 4.4 după ce acesta a fost compensat.

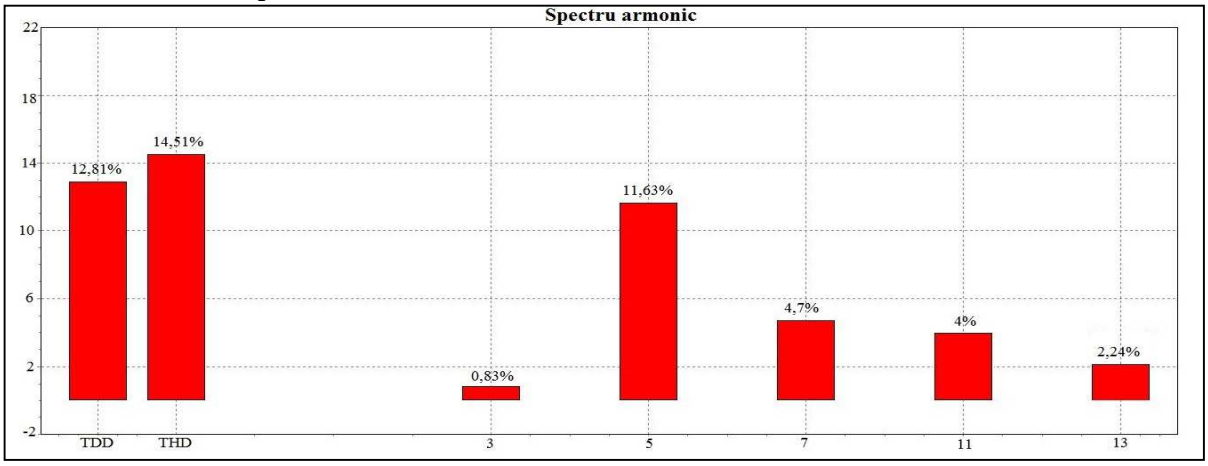


Fig. 4.3. Spectru armonic necompensat

Din spectrul armonic de mai sus reiese că cele mai mari valori sunt ale armonicilor 5, 7, 11 și 13. Aceste armonici de succesiune inversă sunt specifice acționărilor cu electronică de putere, în general, convertizoarelor de frecventă care au convertoare statice în 6 pulsuri.

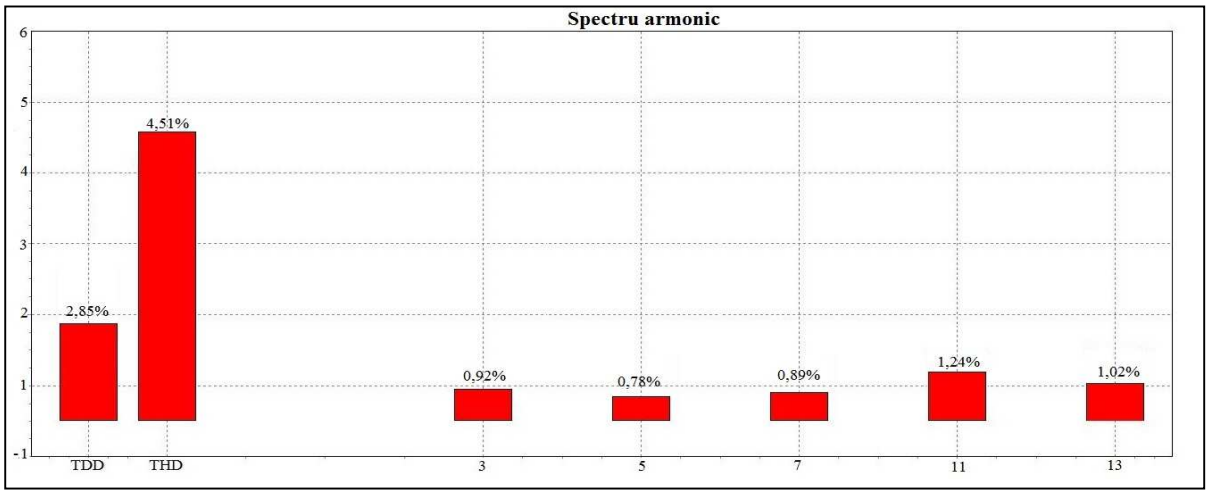


Fig. 4.4. Spectru armonic compensat

Cea mai puternică îmbunătățire a avut loc la armonica de curent de ordinul 5, aceasta fiind redusă de la valoarea de 11,63% la valoarea de 0,78%.

Pentru *factorul de putere* (Fig. 4.5), *puterea reactivă și puterea aparentă* s-au efectuat seturi de măsurători în care, pentru acești parametri s-a monitorizat evoluția la conectarea filtrului în rețea.

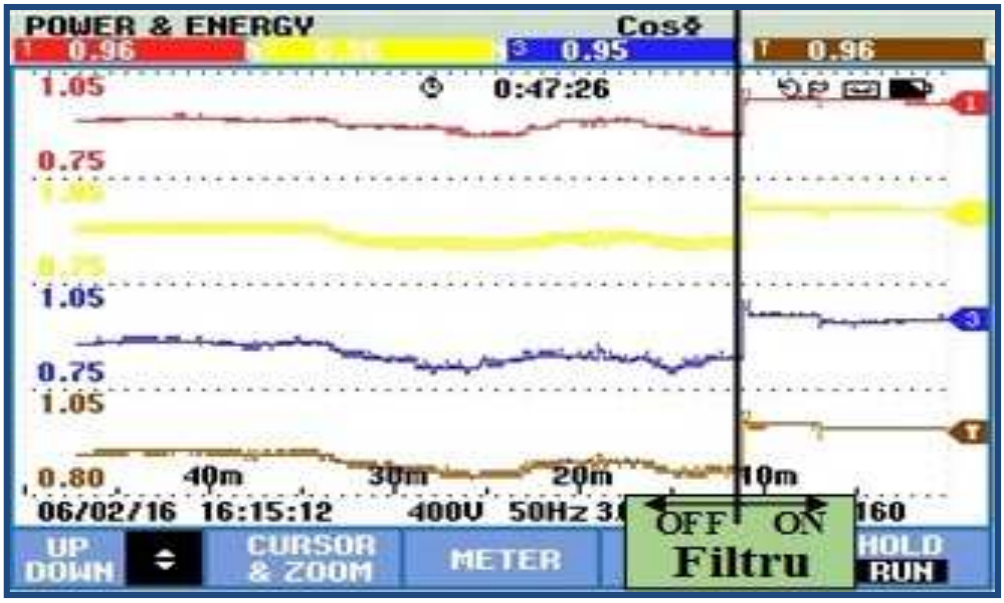


Fig. 4.5. Evoluția factorului de putere înainte și după conectarea filtrului

După cum era de așteptat, *cosφ* a fost îmbunătățit de la 0,87 la 0,96. Este vizibil faptul că pentru o perioadă foarte scurtă, imediat după activarea filtrului, *cosφ* a ajuns la 1. Această valoare corespunde valorii zero a puterii reactive, obținute pentru o perioadă scurtă de timp după activarea filtrului. În concluzie, pentru un timp foarte limitat, filtrul a transformat consumatorul într-unul pur rezistiv, însă datorită constrângerilor tehnice, nu a putut menține același regim pentru o perioadă mai lungă.

După compararea parametrilor electroenergetici rezultă o clară îmbunătățire a acestora, ceea ce conduce în mod direct la eficientizarea consumului energetic al consumatorului analizat. Comparația valorilor acestor parametri este redată în Tabelul 4.1. Prin compararea valorilor sintetizate tabel, se poate concluziona că metoda de compensare este cea corectă iar echipamentul utilizat este bine ales.

Tabelul 4.1. Valorile parametrilor electroenergetici monitorizați

Parametru Monitorizat	**Valori înainte de montarea filtrelor**	**Valori după montarea filtrelor**
Putere reactivă*	19,5 kVAR	5,6 kVAR
Putere aparentă*	123,1 kVA	121,6 kVA
Factor de putere - cosφ	0,87	0,96
THD_U	4,73%	1,43%
THD_I	14,51%	4,51%
TDD	12,81%	2,85%
Armonica de ordin 3	0,83%	0,92%
Armonica de ordin 5	11,63%	0,78%
Armonica de ordin 7	4,7%	0,89%
Armonica de ordin 11	4%	1,24%
Armonica de ordin 13	2,24%	1,02%

* masurătorile s-au facut pe consumator înainte și după conectarea filtrului

4.4.2 Compararea modelelor matematice ale consumatorului înainte și după după instalarea filtrului

Impactul echipamentului de compensare în caracteristica de funcționare a consumatorului se relizează prin compararea modelelor matematice ale consumatorului aferente diferitelor regimuri de funcționare, înainte și după pornirea filtrului.

Din perioada de monitorizare ale consumatorului (4 ore fără filtru și 4 ore cu filtru) se va alege câte 4 perechi de intervale de monitorizare, fiecare pereche fiind identică din punct de vedere al regimului de funcționare. Pentru fiecare set de intervale, consumatorului ii va fi realizat câte un model matematic, unul pentru funcționarea fără filtru și unul pentru funcționarea cu filtru, iar modele care vor fi comparate unul cu celălalt.

Aceste intervale sunt prezentate în Fig. 4.6 (fără filtrare) și Fig. 4.7 (cu filtrare).

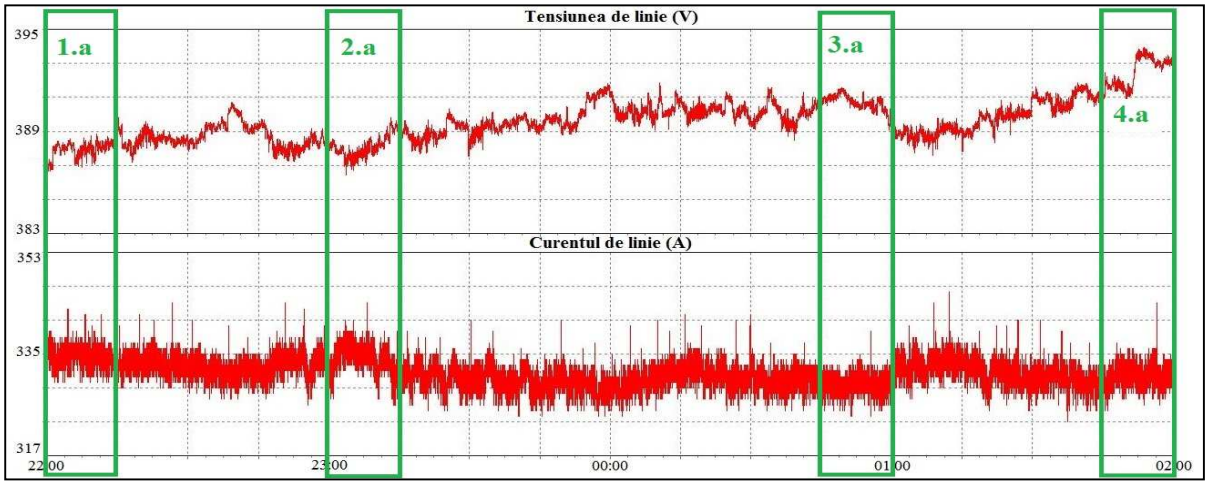


Fig. 4.6. Selecția intervalelor din perioada fără filtrare

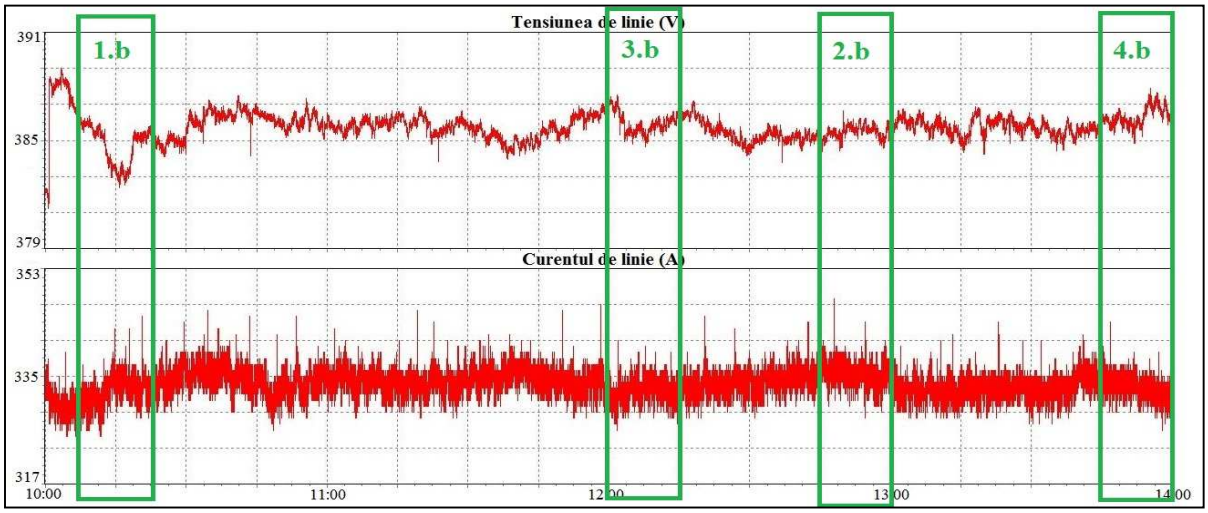


Fig. 4.7. Selecția intervalelor din perioada după filtrare

Astfel, se vor realiza modele matematice pentru fiecare interval, comparându-se modele intervalelor 1.a cu 1.b, 2.a cu 2.b, 3.a cu 3.b și 4.a cu 4.b.

Modele matematice pentru intervalele 1.a și 1.b

Funcțiile polinomiale *U(I)* de la ordinul 1 până la ordinul 7 pentru intervalul 1.a sunt reprezentate în Fig. 4.8, iar cele specifice intervalului 1.b sunt reprezentate în Fig. 4.9.

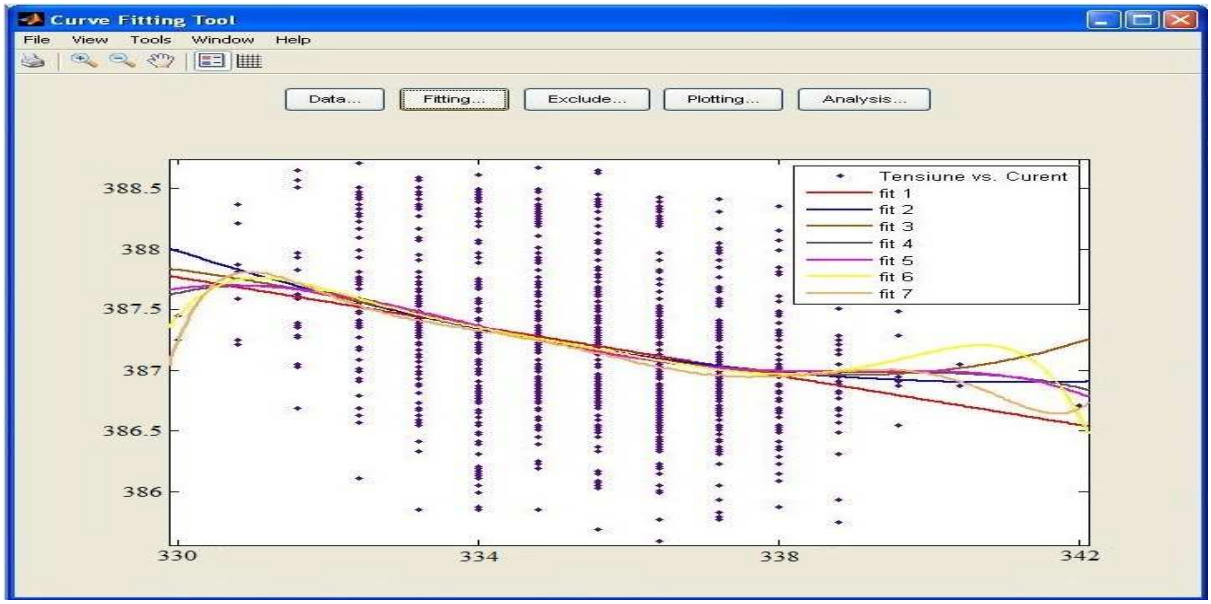


Fig. 4.8. Modelarea caracteristicii *U(I)* pentru intervalul 1.a

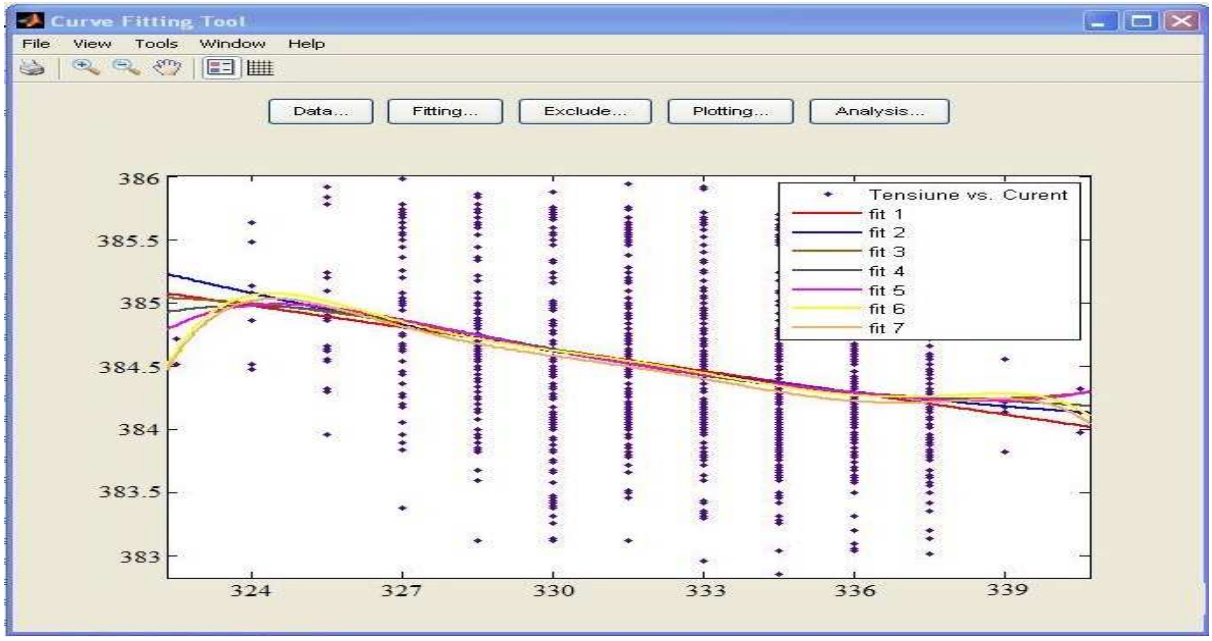


Fig. 4.9. Modelarea caracteristicii *U(I)* pentru intervalul 1.b

Prin compararea formelor de undă pentru cele două modele matematice, se observă că cele specifice intervalului 1.b, adică ale celui cu filtrare, sunt mai liniare.

Valorile parametrilor statistici de aproximare a curbelor pentru cele două intervale sunt prezentate în Tabelul 4.2

Tabelul 4.2. Valorile parametrilor statistici specifici intervalelor 1.a și 1.b

Grad	Parametrii specifici intervalului 1.a				Parametrii specifici intervalului 1.b			
	SSE	R-pătrat	RMSE	R-pătrat ajustat	SSE	R-pătrat	RMSE	R-pătrat ajustat
liniar	334,8	0,08918	0,6106	0,08817	333,5	0,09262	0,6095	0,09161
pătratic	333,4	0,09306	0,6096	0,09104	333	0,09408	0,6093	0,09408
cubic	333	0,09409	0,6096	0,09105	332,6	0,09509	0,6093	0,09206
4	332,6	0,0952	0,6096	0,09116	332,5	0,09533	0,6096	0,09129
5	332,6	0.09523	0,6099	0,09017	332,4	0,09566	0,6098	0,0906
6	332	0,09079	0,6097	0,09079	331,9	0,09723	0,6096	0,09216
7	332,1	0,09572	0,6011	0,09161	333,6	0,09256	0,6115	0,08544

În urma evaluării acestor parametri, funcția polinomială care aproximează cel mai bine caracteristica consumatorului este cea de ordinul 7 pentru intervalul 1.a (fără filtrare) și cea de ordinul 6 pentru pentru intervalul 1.b (cu filtrare).

Cele 7 funcții polinomiale specifice celor două intervale sunt prezentate în Tabelul 4.3 și în Tabelul 4.4.

Tabelul 4.3. Funcțiile polinomiale *U(I)* pentru intervalul 1.a

Funcție	Grad
Poly1 = $-0{,}1606x + 387{,}8$	Liniar
Poly2 = $0{,}03493x^2 - 0{,}1321x + 387{,}8$	Pătratic
Poly3 = $0{,}00884x^3 + 0{,}02945x^2 - 0{,}2971x + 387{,}8$	Cubic
Poly4 = $-0{,}01013x^4 + 0{,}01883x^3 + 0{,}04703x^2 - 0{,}1093x + 387{,}8$	4
Poly5 = $-0{,}00129x^5 - 0{,}01588x^4 + 0{,}02149x^3 + 0{,}03213x^2 - 0{,}2245x + 387{,}8$	5
Poly6= $-0{,}002228x^6 + 0{,}002348x^5 + 0{,}02401x^4 + 0{,}00131x^3 - 0{,}01055x^2 - 0{,}2103x + 387{,}8$	6
Poly7= $0{,}00111x^7 - 0{,}00357x^6 - 0{,}01146x^5 + 0{,}04015x^4 + 0{,}05015x^3 - 0{,}02713x^2 - 0{,}2374x + 387{,}8$	7

Tabelul 4.4. Funcțiile polinomiale *U(I)* pentru intervalul 1.b

Funcție	Grad
Poly1 = $-0{,}2016x + 388{,}1$	Liniar
Poly2 = $0{,}03173x^2 - 0{,}1881x + 388{,}1$	Pătratic
Poly3 = $0{,}01014x^3 + 0{,}03165x^2 - 0{,}1946x + 388{,}1$	Cubic
Poly4 = $-0{,}00541x^4 + 0{,}01213x^3 + 0{,}06012x^2 - 0{,}2179x + 388{,}1$	4
Poly5 = $-0{,}00055x^5 - 0{,}00488x^4 + 0{,}01661x^3 + 0{,}05801x^2 - 0{,}2251x + 388{,}1$	5
Poly6= $-0{,}00249x^6 + 0{,}00199x^5 + 0{,}02441x^4 + 0{,}00131x^3 - 0{,}01005x^2 - 0{,}2101x + 388{,}1$	6
Poly7= $0{,}00113x^7 - 0{,}00369x^6 - 0{,}01171x^5 + 0{,}03319x^4 + 0{,}04828x^3 - 0.03001x^2 - 0{,}2434x + 388{,}1$	7

4.4.3 Calculul economico-financiar pentru soluția de compensare implementată

Pentru a analiza eficiența soluției propuse de optimizare a consumului energetic s-au făcut înregistrări ale consumului energetic timp de două luni în perioada aprilie-mai 2016, consum care este comparat cu cel înregistrat în același perioadă a anului precedent 2015. Aceste date sunt prezentate în Tabelul 4.5 și în graficele din Fig. 4.10.

Tabelul 4.5. Analiza consumului energetic al consumatorului industrial

	2015 (Aprilie - Mai)	2016 (Aprilie-Mai)
Energie consumată (KWh)	116739	113704
Productie (t)	4578	4987
Consum (KWh/t)	25,5	22,8

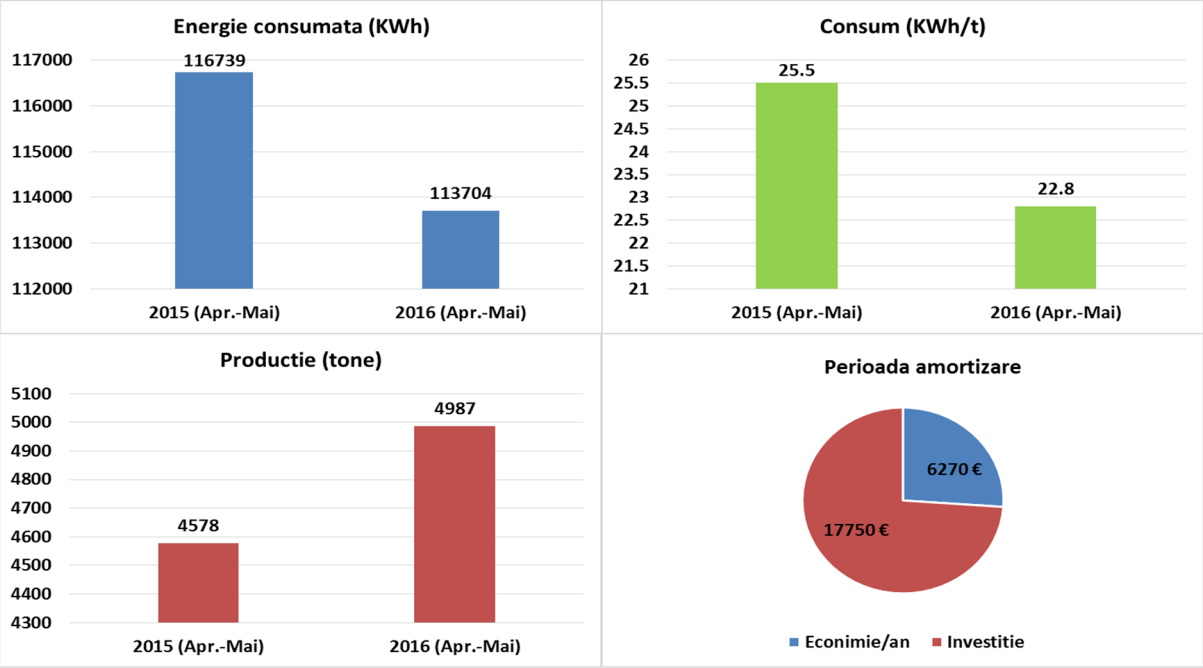


Fig. 4.10. Graficele analizei economico-financiare

Conform datelor din tabelul de mai sus, după instalarea sistemului de compensare, consumul pe tona de produs finit (margarină) a scăzut cu 2,7 KWh, iar raportând această economie la cele 4987 de tone de margarină produse în cele două luni, rezultă o cantitate de energie de 13464 KWh economisită.

Prețul energiei electrice este de aproximativ 350 de lei pe 1 GW, astfel echivalentul în bani a celor 13,64 GW economisiti reprezintă suma de 4712 lei pentru o perioadă de două luni.

Valoarea totală a investiției a fost de 17750 de euro și considerând ca la fiecare două luni se economisesc 1045 de euro, rezultă ca perioada de amortizare a investiției va fi de aproximativ 34 de luni.

CAPITOLUL V
CONTRIBUŢII ORIGINALE ȘI CONCLUZII

Pornind de la ideea că pentru a îmbunătăți substanțial un proces, trebuie să se facă cercetări și studii în detaliu, consider că este un mare avantaj dacă s-ar cunoaște de la bun început ce caracteristică, ce tip de consum și cum este clasificat un anumit consumator în funcție de standardele energetice, toate acestea pentru a optimiza consumurile energetice şi, în aceaşi timp, pentru a negocia prețuri mai bune și pentru a evita sancțiuni.

Pentru consumatorul industrial analizat există o competiție foarte mare în aceeași ramură de activitate, iar o mai bună gestionare a resurselor și un nivel mai ridicat de eficiență energetică devin obiective imperative pentru a rămâne competitiv.

Această teză analizează consumatorul industrial din punct de vedere al regimurilor de funcționare, având ca scop final reducerea consumului energetic prin scăderea nivelului de putere reactivă consumată și prin compensarea spectrului armonic din rețeaua de distribuție a energiei electrice a consumatorului.

În urma analizelor și cercetărilor proprii au rezultat următoarele contribuţii personale:

- S-au analizat regimurile electroenergetice specifice caracteristicii de funcționare a consumatorului, pe baza studiului unui mare număr de referinţe din literatura de specialitate
- S-au monitorizat și analizat parametrii electroenergetici ai consumatorului industrial pe două dintre liniile magistrale de distribuție a energiei electrice. Pe baza referințelor de specialitate, consumatorul a fost comparat cu standardele specifice din domeniul transportului și distribuției energiei electrice.
- Pe baza analizei magistralei cu regimul deformant cel mai accentuat, s-au creat modele matematice pentru consumator pe diferite perioade de timp pe durata cărora consumatorul a trecut prin diferite regimuri de funcționare. Modelele matematice au avut la bază regresia polinomială, iar calculul matematic s-a făcut în Matlab, generându-se funcții polinomiale de până la ordinul șapte. Formele de undă rezultate au fost evaluate folosind parametri statistici de evaluare, rezultând astfel caracteristici ale valorilor instantanee *u(i)* și medii *U(I)* cât mai apropiate de datele reale măsurate.
- Pe baza referințelor de specialitate au fost analizate metodele de optimizarea a consumului energetic al consumatorului. Au fost evaluate metodele de compensare a puterii reactive și metodele de filtrare a armonicilor de curent.

- Pe baza analizelor și măsurătorilor efectuate s-a ales ca metodă de optimizare a consumului energetic, instalarea pe magistrala de distribuție numărul patru, a unui echipament de compensare format din două filtre active. Filtrele au fost special proiectate de Schneider Electric, pe baza parametrilor monitorizați.
- S-au dezvoltat metode de comparare a caracteristicii de funcționare a consumatorului înainte și după instalarea echipamentului de compensare. Metoda are la bază modelul matematic dezvoltat prin regresie polinomială cu ajutorul căruia au fost comparate comportamentele consumatorului cu și fără filtrele active.
- S-a analizat eficiența soluției de compensare și din punct de vedere economic, prin efectuarea unui calcul financiar prin care s-au atestat beneficiile implementării soluției propuse.

Direcţii de dezvoltare

Efectele regimului deformant reprezintă o preocupare tot mai mare în gestionarea rețelelor electrice de distribuție, economii semnificative pot fi realizate și prin îmbunătățirea calității energiei electrice. Un pas foarte important în obținerea acestor beneficii, este reprezentat de înțelegerea cerințelor și limitărilor sistemului. De aceea, condițiile locale de exploatare trebuie să fie analizate înainte de a pune în aplicare o soluție, este obligatorie analiza regimului deformant al rețelei dar și cunoașterea standardelor și reglementărilor în vigoare.

Dezvoltarea unor tehnologii industriale provoacă perturbări importante care duc la niveluri mai mici ale calității energiei electrice. În scopul de a îmbunătăți calitatea energiei, companiile investesc sume uriașe de bani, iar un management mai bun al resurselor și un nivel mai ridicat de eficiență energetică devin obiective imperative, în scopul de a rămâne competitive. Filtrarea pasivă reprezintă în continuare soluția cea mai economică, dar cu o performanță medie, performanțele ridicate pot fi atinse numai cu ajutorul celei mai noi tehnologii, care includ filtrele active însă cu mențiunea că acestea sunt mai scumpe decât cele pasive.

Următorii pași ai cercetării se vor concentra pe dezvoltarea de algoritmi predictivi folositi în sistemul de management al energiei, pentru a prevedea cu o cât mai mare exactitate consumul de energie electrică. În acest fel compania va fi în măsură să achiziționeze o cantitate exactă de energie, aceasta pentru a evita eventualele penalizări, impuse de reglementările în vigoare.

BIBLIOGRAFIE

[1] Iacobescu, GH., Iordănescu, I., Tudose, M. – *Reţele şi sisteme electrice*. Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1979

[2] Ungureanu, M., - *Analiza prin modelare şi simulare a calităţii energiei în medii de utilizarea energiei electrice*. SNCEE Târgovişte, 2003

[3] Lazar, S., Roşca, M., - *Note de curs „Calitatea energiei electrice”*

[4] Hermina, A., Golovanov, N., Răşcanu, V., Păun, D., Păun, C., – *Sistem de monitorizare al calităţii serviciului de furnizare a energiei electrice în concordanţă cu reglementările din România*, Lucrările ştiinţifice ale Forumului Regional al Energiei, Neptun, Iunie 15-19, 2008

[5] Emil, C., Iosif, V.N., Sergiu, C. – Low Voltage Power Quality at the Level of Harmonics - An Educational Perspective, EEA, 2011

[6] Popescu, S., Stan, C., Sotri, S., Cîrstea, D., - *Optimizări în reţelele electrice*. Ed. Macarie, Târgovişte, 2003

[7] Toader, C., Postolache, P., Porumb, R., – *Influenţa factorilor de nesimetrie asupra pierderilor de putere şi energie electrică ale liniilor electrice în regim armonic nesimetric*. SNCEE Târgovişte, 2011

[8] Albert, H., Mihailescu, A., Iancu, A. – *Aspecte privind consumul de energie activă aferent consumului suplimentar de energie reactivă în raport cu factorul de putere neutral*. Buletin ISPE nr. 3, 1999

[9] Andrei, H.; Cepisca, C., Spinei, F. – *The modelling of the power factor in steady state non sinusoidal regime with Mathcad techniques*. International Conference on Automation Quality and Testing, Cluj Napoca, 2006

[10] PE 124/95 - Normativ pentru stabilirea soluţiilor de alimentare cu energie electrică a consumatorilor industriali şi similari

[11] **Oprea, G. - *Regimuri electroenergetice și mărimi caracteristice,* Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgovişte, 2014.**

[12] http://www.powercet.com/uploads/files/fluke_powerlog_users_manual.pdf

[13] EN 50160:1999 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems“;

[14] Markiewicz, H., Klajn, A.: ”Voltage Disturbances, Standard *** EN 50160 – Voltage Characteristics în Public Distribution Systems”, Wroclaw University of Technology, 2004,

http://www.cda.org.uk/megab2/elecapps/PQ_Guide/542-standard-EN-50160-voltagecharacteristics- in.pdf (tradus în http://www.sier.ro/Articolul_5_4_2.pdf)

[15] SR EN 61000-6-4:2003 ”Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 6-4: Standarde generice. Standard de emisie pentru mediile industriale”

[16] EN 61000-2-4:2002 ”Electromagnetic compatibility (EMC). Environment. Compatibility levels în industrial plants for low-frequency conducted disturbances”;

[17] S. Lynch, Dynamical Systems with Applications using MATLAB. Birkhäuser, 2004.

[18] Breaz N., Crăciun M., Gașpar M., Paraschiv-Munteanu I. – Modelare prin matlab, POSDRU/56/1.2/S/32768, 2011

[19] A.J.M. Ferreira, MATLAB Codes for Finite Element Analysis, Springer. 2009.

[20] **Oprea, G. -** ***Sisteme de măsurare, achiziție și modelare numerică a caracteristicilor unui mare consumator industrial*****, Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgoviște, 2015.**

[21] IEEE Std. 112-1991, ”Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.“

[22] Arrillage, J., Watson, N., Chen, S. – *Power System Quality Assessment,* John Wiley & Sons, New York, 2001.

[63] Andrei, H., Cepisca, C., Grigorescu, S.D. – *Power Quality and Electrical Arc Furnaces*, pp. 55-100, chapter 2 of the book *Power Quality***,** InTech, Wien, 2011.

[24] Baggini, A. – *Handbook of power quality*, John Wiley & Sons, Ltd, England, 2008

[25] Tugulea, A. - *Consideratii referitoare la definirea factorului de putere pentru sisteme trifazate dezechilibrate*, Energetica , Nr. 4, 1986;

[26] L.O. Chua, A. Ushida, - *Algorithms for computing almost-periodic steady-state response of nonlinear systems multiple input-frequencies*, IEEE. Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS 28, pp. 953/971, 1981.

[27] A.P. Schwartz, - *Computer aided design of microelectronic circuit and system*, Academic press, London, 1987.

[28] H.Andrei, D. Popovici, - *Algoritmus zum bestimen demy frequenz spekter bei den nichtlinearen kreiselement im periodische nichtsinusformigem regime*, Politehnica University of Bucharest, Scientific Bulletin, series C Electrical Engineering, vol. 60, number 3-4, pp.133-139, 1998.

[29] ARTINEK,P.-DAŠA, T. Evolutionary algoritmes by ARC filter synthesis. ECCTD 05, Cork,2005,pp.155- 159.

[30] **Oprea G.** ***Implementation of ISA S88.1 standard into an automated process,*** **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2013, Nr4, p. 16-20, ISSN1843-6188**

[31] Balan, G., Pencioiu, P., Golovanov, N. – Probleme actuale privind calitatea energiei electrice în sistemele electroenergetice, ICEMRAD, 2012

[32] HÁJEK, K. - SEDLÁČEK, J.: Lossy LC Ladder Prototypes and their use for ARC Filter Optimization. WSEAS TRANSACTIONS on ELECTRONICS, Issue3, Volume2, July 2005, pp. 94-99,ISSN 1109- 9445

[33] **Oprea, G. -** ***Metode de optimizare a consumurilor energetice ale unui mare consumator industrial,*** **Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgoviște, 2016**

[34] **Oprea G. -** ***Measurement analyzes of a large industrial consumer,*** **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2014, Nr.1, p.48-55, ISSN1843-6188**

[35] **G. Oprea, H. Andrei -** ***Measurement data analysis of power quality for industrial loads,*** **Proc of IEEE-Advanced Topics in Electrical Engineering -ATEE, 2015, paper SIMOP P8 ISSN 2068-7966, indexat ISI**

[36] **H. Andrei, P.C. Andrei, G. Oprea, B. Botea -** ***Basic Equations of Linear Electric and Magnetic Circuits in Quasi-stationary State Based on Principle of Minimum Absorbed Power and Energy,*** **Proc. IEEE-ISFEE, Bucharest, 2014, Pp 16, ISBN 978-1-4799-6820-6, indexat IEEE Explore**

[37] **Oprea G., Andrei H. -** ***Power Quality Analysis of Industrial Company Based on Data Acquisition System, Numerical Algorithms and Compensation Results,*** **Proc of IEEE - ISFEE 2016, 30 June -1 July, paper #148-POS15**

[38] **Oprea G., Andrei H. -** ***The optimization of energy consumption for an industrial consumer,*** **Proc of IEEE - ECAI 2016, paper #52-POS15**

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
VLALAHIA UNIVERSITY OF TÂRGOVIȘTE
IOSUD–DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES
Domain: ELECTRICAL ENGINEERING

DOCTORATE THESIS

<<SUMMARY>>

Contributions on modeling and optimizing the energy performances of a large industrial consumer

SCIENTIFIC COORDINATOR:
Prof.univ.dr. ing. Horia Leonard ANDREI

PHD STUDENT:
Gabriel OPREA

TARGOVISTE
2016

TABLE OF CONTENTS

Acknowledgements 3

Introduction 4

Keywords 5

Chapter I: **Electro energetic regimes and characteristic parameters** 6

1.1. Characteristic parameters of power system 6

1.2. Harmonics 7

1.3. Power factor 9

Chapter II: **Measuring, acquisition and processing systems of electrical parameters of a large industrial customer** 10

2.1. Power supply system of industrial consumer analyzed 10

2.2. Alignment of industrial consumer to specific standards 15

2.2.1. EN 50160 regulations concerning the voltage characteristics of distribution networks 16

2.2.2. Electromagnetic compatibility regulations of international standards specific to industrial consumers 17

Chapter III: **Numerical algorithms for modeling the characteristics of a large industrial customer** 19

3.1. Polynomial modelling of the *U(I)* characteristic for the industrial consumer 19

3.2. The final conclusions of modeling the seven intervals 23

Chapter IV: **Methods for energy consumption optimization of a large industrial consumer** 24

4.1. Industrial Energy Efficiency 24

4.2. Power factor compensation 24

4.3. Filtering of current harmonics 25

4.4. Optimizing the energy consumption of industrial consumer 25

4.4.1. Checking performances after using the filter 26

4.4.2. Comparison of mathematical models of the consumer before and after installing filter 29

4.4.3. Economical and financial calculation for implemented solution 32

Chapter V: **Original contributions and conclusions** 33

Bibliography 35

Acknowledgements

Once with the completion of this stage of my life, I want to say a few words of thanks to those who guided me and gave me support during this PhD research.

PhD program was conducted under the leadership of Prof. Univ. Dr. Ing. Horia Leonard ANDREI, who as scientific coordinator offered me support and guided me in the research steps that led to reach the proposed goals, by selecting literature, providing suggestions and observations on the implementation of the PhD reports, writing and publishing scientific papers. For all these I want to bring him warm thanks.

Further, I wish to express my gratitude to the members of the mentoring committee for tips and suggestions offered, namely Prof. Univ. Dr. Ing Dinu COLTUC, Prof. Univ. Dr. Ing Nicolae Vasile and Prof. Univ. Dr. Ing Valentin DOGARU-ULIERU.

Respectful thanks to PhD committee members, Prof.Univ.Dr.Ing, Costin CEPISCA and Prof.Univ.Dr.Ing. Sorin Dan Grigorescu who analyzed closely PhD thesis and sent me comments extremely useful for improving thesis.

Not lastly, my gratitude is heading towards to my family who showed understanding, support and love during the doctoral program and the colleagues who helped me and understood me during the three years of research.

Targoviste 2016

Introduction

This paper addresses in detail the analysis, modeling and optimization of energy performance of a large industrial consumers connected to the national power system.

The subject of this paper is extremely important, considering the actual conditions when, globally, the world put great emphasis on resource saving and sustainable business development.

The first chapter presents theoretical aspects related to the characteristic parameters of the power system, analyzing operating regimes specific to an industrial consumer. It made particular reference to unbalances operating regimes, focusing on the factors that influence these regimes.

In the second chapter were analyzed measuring systems, acquisition and processing of electrical parameters specific to an industrial consumer. In the first part were analyzed the components of a power system specific to a consumer industrial and in the second part analyzed actual energy performances of industrial consumer, including data acquisition system used in consumer monitoring. The industrial consumer analyzed is a foods factory of Unilever company, located in Ploiesti. The chapter concludes with a thorough analysis of the measured parameters and with the comparison of the consumer in terms of electromagnetic compatibility with the national and international standards that regulate the permissible limits for the non-sinusoidal regime of electric networks.

After approximately 20 hours monitoring of industrial consumer, in the 3rd chapter are developed and analyzed mathematical models for different regimes contained operation during the monitoring period. Of the 20 hours they were identified 7 intervals of 15 minute each, intervals defined as suggestive to cover all operating regimes of consumer. From the data measured, and using polynomial regression, for the seven intervals have been identified, was developed mathematical models for accurate of *U(I)* characteristics

The 4th chapter examines methods to optimize the energy consumption for industrial consumers. Are theoretically detailed the main methods for improvement of energy consumption, namely the compensation of power factor by reducing the consumption of reactive power and filtering methods for current harmonics. Theoretical aspects are presented and then are analyzed the using of passive and active filters and the capacitor banks.

Following these analyzes, was chosen the usage of two active filters mounted in parallel, filters that attenuate the harmonic spectrum and improve the power factor. The

measurements and the new mathematical models of the consumer with active filter installed, being compared with the ones without filter, confirm the results of research and clearly demonstrates the effectiveness of the implemented solution.

To prove the effectiveness of the investment, at the end of the chapter is developed a financial and economic calculation, making a benefit and cost ratio, calculation which clearly proves the profitability of this investment.

The original contributions and conclusions are presented in Chapter 5.

Finally, is presented the bibliography that has been studied for developing this paper.

Keywords

- Industrial consumer
- Quality
- Harmonic
- Power factor
- Reactive power
- Active power
- Non-sinusoidal regime
- Performance indicators
- Waveforms
- Electrical standard
- Modeling
- Polynomial regression
- Measuring equipment
- Data acquisition
- Compensation
- Filter
- Optimization
- Electric voltage
- Electrical current
- Analysis

CHAPTER I
ELECTROENERGETIC REGIMES AND CHARACTERISTIC PARAMETERS

The electro energetic system is perhaps the most complex achievement of humanity, representing a wide distribution network, specific to each continent, region and country. An electro energetic system (EES) is intended to convert sources of energy into electricity and to transport this electricity to areas of consumption and to distribute it to consumers. The advantage of using electricity results from the fact that it can be transported long distances and easily controlled with high efficiency and reliability [1].

For an optimal running, the study and the knowledge of the operating regimes are very important, constituting main pillars in the analysis of the electro energetic system.

A regime of the electro energetic system represents a certain system status, determined by the values of main parameters: power, voltage, current and frequency, which characterizes the transformation, transmission and distribution process of electricity.

4.1. Characteristic parameters of power system

On the electricity market, optimal operating regimes must be conducted in the most efficient manner, thereby helping to maintain the lowest possible prices for electricity delivered to customers and consumers.

For optimal operation of the national power system must be pursued mainly, the achievement of a maximum economic efficiency, while respecting and limitations on safety and quality of the power supply of consumers. The safety and quality restrictions are determined by technical and economic calculations, design and operation standards of the power system, and ANRE regulations (National Regulatory Authority in Energy).

The quality of electrical power is defined by the main parameters involved in conditioning the use of electricity [2].

By quality assurance of electrical power means keeping all parameters of electricity within limits agreed. The qualitatively level of electrical energy in a power system node can be classified according to:

- quality of voltage;
- deviation of voltage from imposed one,
- quality of frequency;
- deviation of frequency from imposed one;

- symmetry of the three-phase system (current/voltage);
- deviation from sinusoidal voltage and current curves;
- quality of electrical power supplied [3].

Technological processes of modern consumers may be implemented effectively only if a power system is able to ensure the appropriate quality of electricity supplied, can take a number of disturbances introduced into the supply network of electrical installations and ensure any increases in electricity demand [4].

4.2. Harmonics

Harmonics are waveform with frequency as an integer multiple of the fundamental frequency generated mainly by non-linear loads on the network.

Operating deforming regimes of power system are regimes in which voltage waveforms are periodic, but a minimum one of them has a different type than the sinusoidal variation [5].

Once amplitudes and rank harmonics are determined, home deformed curve is calculated by summing the harmonic components point to point.

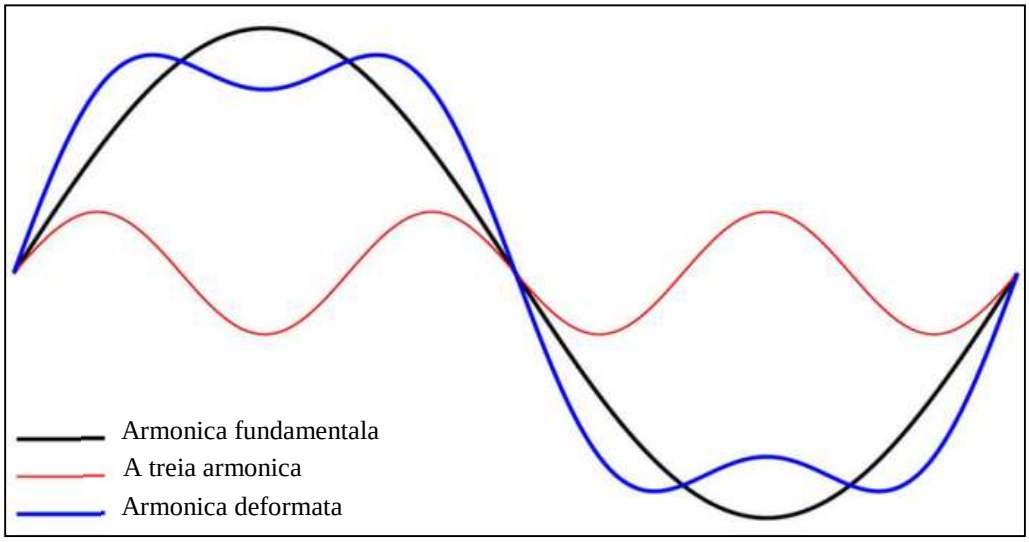


Fig. 1.1. Home deformed curve [6]

In Fig. 1.1 The blue curve is obtained from the sum of two components, the fundamental (red curve) and harmonic of rank 3 (blue curve).

Conversely, the decomposition of deformed curves in harmonic and fundamental components is performed using ***Fourier analysis.***

Currently as quality indicators for non-sinusoidal periodic regime following parameters are determined [7]:

The effective value Y of non-sinusoidal parameters:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2} y^2\,dt} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} Y_k^2} \tag{1.8}$$

where:

T represents the period of the distorted curve;

Y_k is the effective value of the order *k* component determined by Fourier analysis.

Total Harmonic Distortion - THD is the ratio between the actual value of harmonics and the actual value of fundamental:

$$\delta = THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left(\frac{Y_k}{Y_1}\right)^2} \tag{1.9}$$

where:

Y_k represents the amplitude of the harmonics of rank *k*;

Y_1 represents the magnitude of the fundamental.

Partial Weighted Harmonic Distortion - PWDH:

$$\delta_{IP} = PWDH = \sqrt{\sum_{14}^{40} k\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \tag{1.10}$$

where:

I_k represents the harmonic currents of rank k;

I_1 represents the harmonic current of fundamental.

Harmonic level is the ratio between the actual value of the harmonic and the actual value of the fundamental:

$$\gamma_{kI}[\%] = \frac{I_k}{I_1}\,100[\%] \tag{1.11}$$

In the analysis of the current distorted curves shall be deemed intervals into which the current absorbed is reduced, shall not be taken into account in the statistical analysis of the distortion factor and the harmonic level.

In general, for static analysis of THD, for current distorted are removed the curves in that the current absorbed is less than 20% of its normal value [7].

4.3. Power factor

Power factor is defined as a parameter of a capacity of a current alternative circuit to provide or absorb active power.

This parameter is very important in assessing the loss of power in the power system, in both directions, from both parts the source and the consumer, being pursued by the of the specific systems of the industrial consumers [8].

Power factor value is limited by the contractual requirements agreed between the supplier and the consumer.

In the electric grids where parameters vary periodically, have defined two computing relationships of power factor [9]:

- The first definition is given by the ratio between active power and apparent power:

$$PF^{def} = \frac{P_{tot}}{U_{ef} I_{ef}} \tag{1.12}$$

- The second definition for power factor refers to the ratio between active power and apparent power on fundamental; power factor calculated thus is named phase shift:

$$DF = \cos\theta_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \tag{1.13}$$

In the case sinusoidal regimes both ratios are equal. For a regime as close to sinusoidal one it can be written:

$$PF = \frac{DF}{\sqrt{1 + THD^2}} \tag{1.14}$$

CHAPTER II
MEASURING, AQUISITION AND PROCESSING SYSTEMS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF A LARGE INDUSTRIAL CONSUMER

In Romania 50% of the amount of electricity generated is supplied to industrial consumers. In these circumstances it is very important, as when a factory is designed, to take into account, in particular, in addition to the maximum power installed and the ratio between active power and reactive power of receivers to be installed, in order to avoid over or undersize power plants.

As a result of calculated values as well as the examination of the situation in the area of power system in which will be placed the factory, several scenarios regarding the connections to the system and the internal distribution system are considered, after which, depending on the efficiency/price ratio select the most advantageous variant, to be carried out [10].

4.1. Power supply system of industrial consumer analyzed

The objective of this thesis is the analysis of the suppling power solutions, as well as improving the energy performance of large industrial consumer with the objective of optimizing and modeling the energy to achieve an operational algorithm for this consumer.

The consumer is a foods factory from Ploiesti, as part of the multinational company Unilever [11].

The industrial consumer chosen for paper is supplied from NES (National Energy System) from a distribution knot with 20 kV voltage, having an installed power transformer station of 2 MVA with an average power consumption of 1.5 MVA.

Distribution scheme is a mixed one that includes both, radial schemes and schemes with main lines and bus. From transformer station leaves 4 lines to the general distribution switchboards (GDS), located in different areas of the factory. The GDS are sized differently in terms of installed power, depending on the nature and the power of the receptor that they serve.

The main electricity consumers of the factory are:

- asynchronous electric motors with outputs up to 80 kW;
- electric ovens with outputs of up to 30 kW;
- compressed air compressors with outputs of up to 100 kW;
- ammonia compressors with powers up to 150 kW;
- lighting with fluorescent lamps, LED, etc.;

- air-conditioning systems with power 50 kW.

The level of automation is increased, using at large scale, applications with power semiconductors such as frequency converters, switched-mode power supplies, etc.

Monitoring of power parameters of industrial consumer, was used a measuring instrument, which is basically a power quality analyzer from Fluke 430 (Fig. 2.1).

Fig. 2.1. Quality analyzer from Fluke 430 series

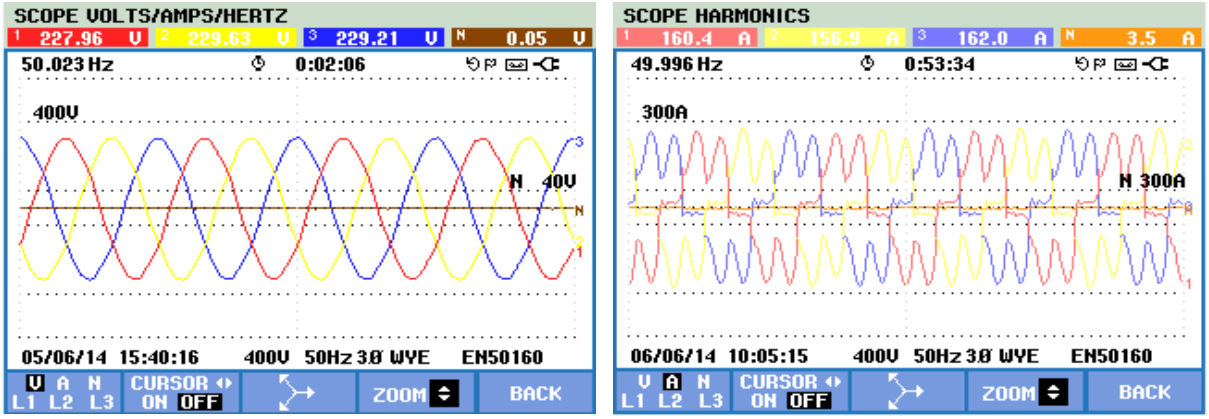
According to the distribution scheme has been made a set of measurements for 2 different main lines:

- **point 1**, the measurement of parameters from the GDS4 which has installed power of 1 MVA, having us main consumers a refrigeration system with compressors of ammonia, with two groups of unit 150 kW each, an air compressor with the power of 100 kW and other auxiliary consumers amounting to 100 kw;
- **point 2**, the measurement of parameters from the GDS1 which has installed power of 0.4 MVA, having us main consumer's margarine-making machines with engines up to 85 kW

Measurements in point 1

Waveforms and harmonics

- fundamentals of voltage (a) and current (b) (Fig. 2.2).



a). b).

Fig. 2.2. The waveform of the voltage and current

- the waveform of the current and voltage to L1 phase - (Fig. 2.3)

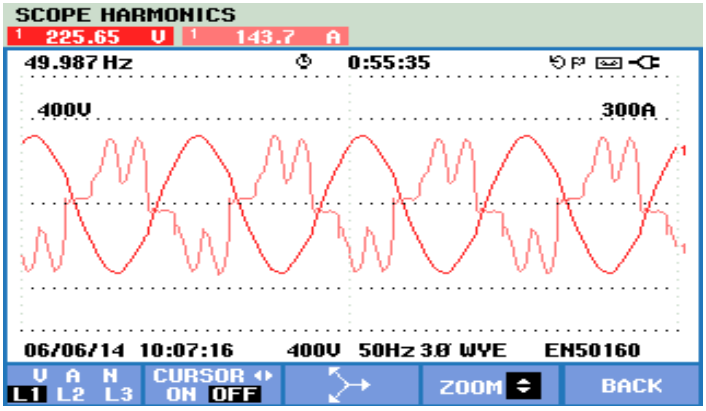
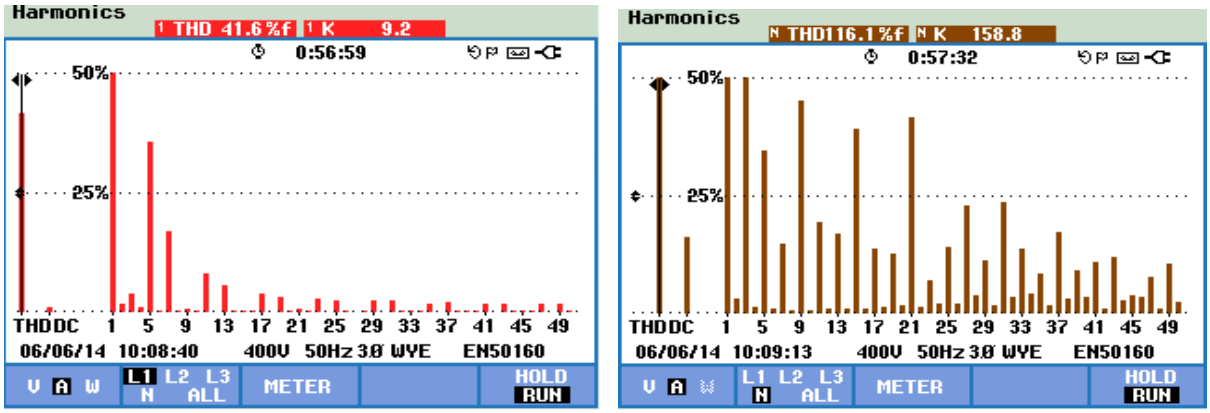


Fig. 2.3. The waveform of the voltage and current on one phase

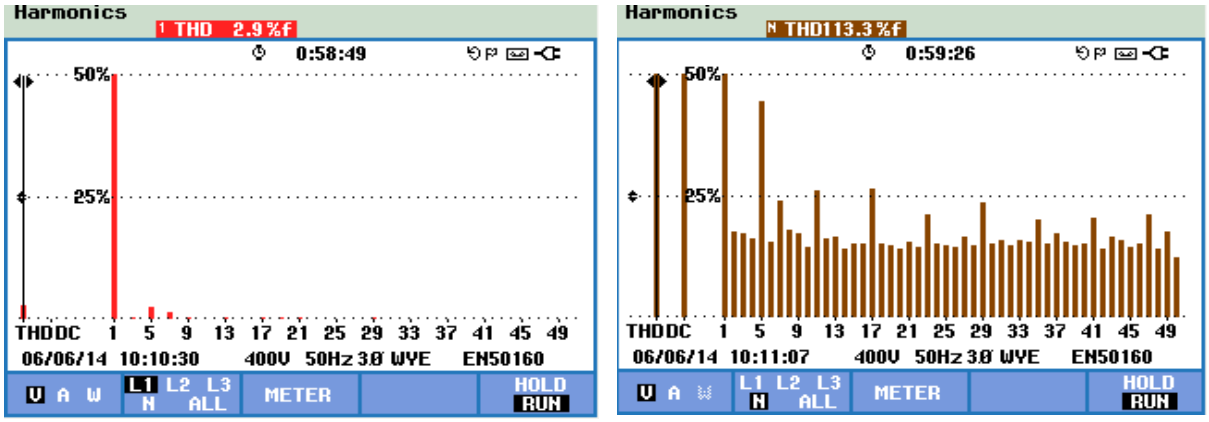
- harmonics spectrum for current for L1 (a) and neutral (b) (Fig. 2.4).



a). b).

Fig. 2.4. The spectrum of current harmonics

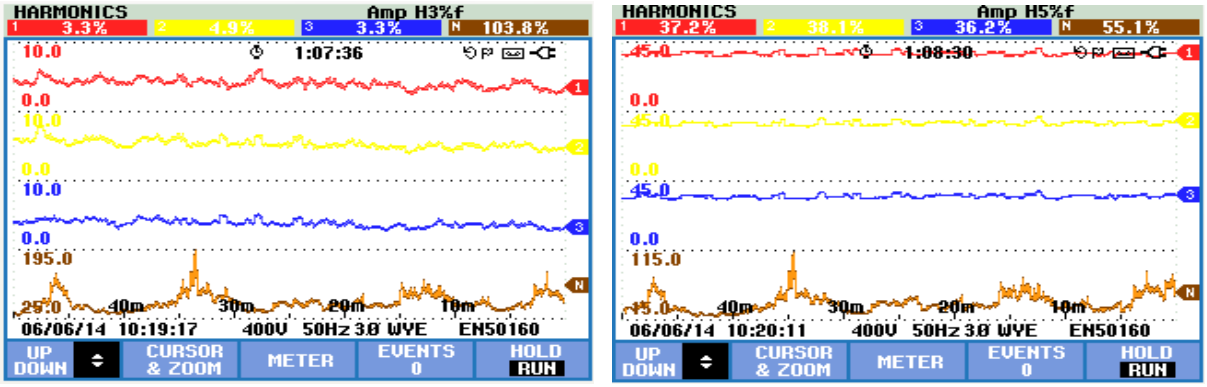
- voltage harmonics spectrum for L1 (a) and neutral (b) (Fig. 2.5).



a). b).

Fig. 2.5. Voltage harmonics spectrum

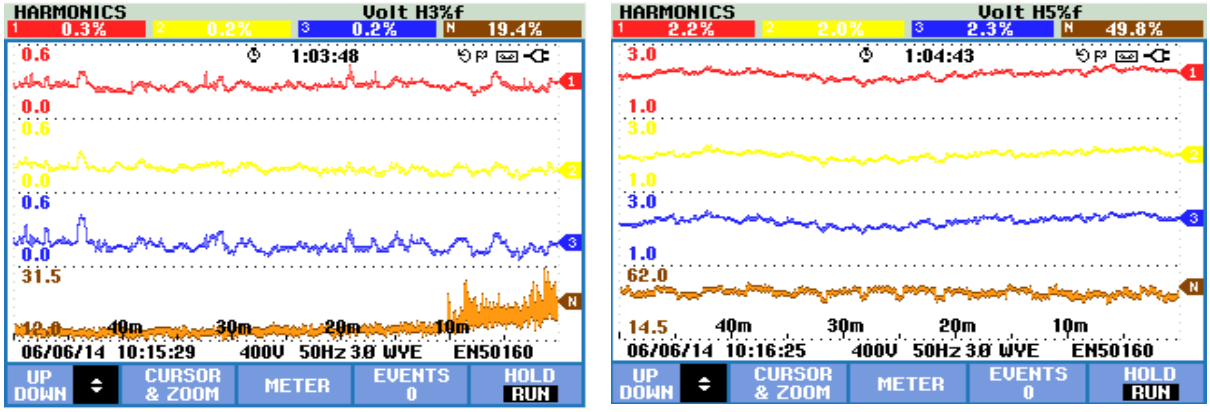
- evolution of the harmonics of rank 3 (a) and (b) rank 5 for currents over a period of time of 40 min. (Fig. 2.6).



a). b).

Fig. 2.6. The evolution of current harmonics

- evolution of the harmonics of rank 3 (a) and (b) rank 5 for voltages over a period of time of 40 min. (Fig. 2.7).



a). b).

Fig. 2.7. Evolution of voltage harmonics

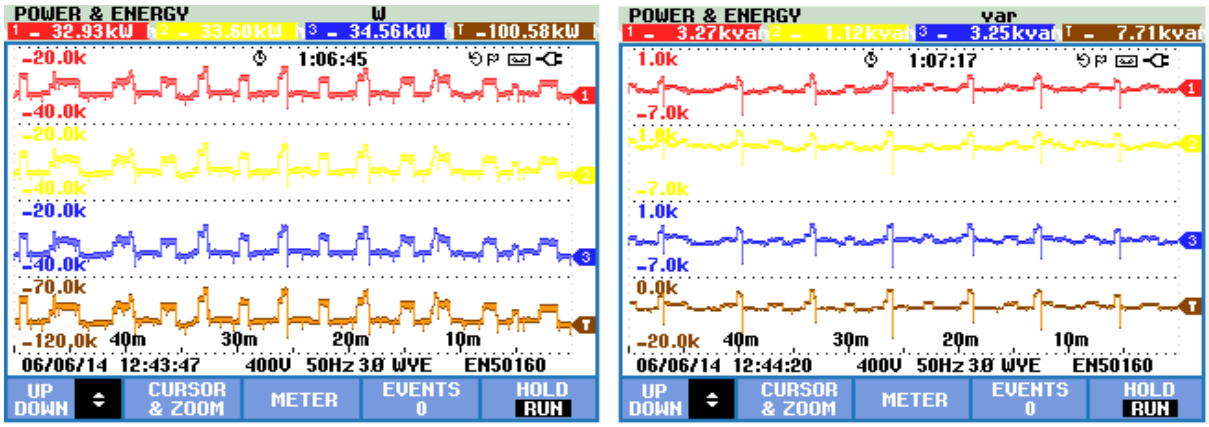
For the analyzed bus, from unbalance point of view due to harmonics, voltage quality is clearly superior in relation to current quality which it absorbs on the three phases plus neutral [11]. The current waveform is distorted due to the harmonics of the higher rank, who have enough large values.

Total Harmonic Distortion – THD of voltage is the average of 2.9% for each phase, and THD of current is the average of 46.6%.

Power and power factor

Has to be mentioned, that the power measurement is performed with current sensors mounted in opposite phases, values recorded will be taken in modulo.

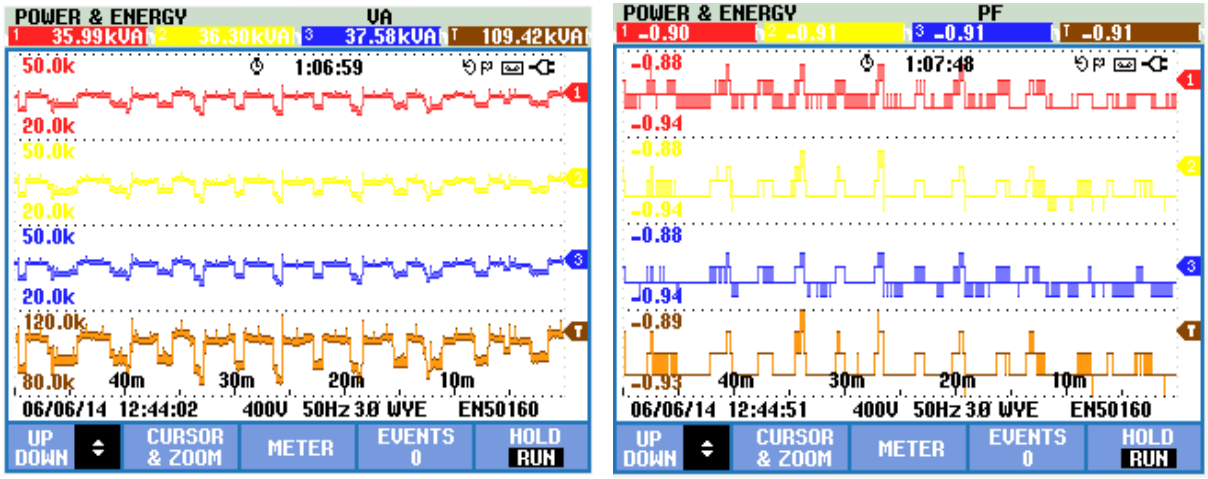
- the evolution of active power (a) and reactive power (b) absorbed over a period of time Fig. 2.8.



a). b).

Fig. 2.8. The evolution of active and reactive powers

- the evolution of apparent power (a) and power factor (b) measured over a period of time (Fig. 2.9).



a). b).

Fig. 2.9. The evolution of apparent power and power factor

The analysis in terms of absorbed powers variation by the receptors connected, leads to the conclusion that on this bus the power absorbed vary quite a lot, because of and many connections and disconnections of receptors.

There have been variations of reactive power between 1kVAR and 7kVAR during the period of 40 min of monitoring. In this period the power factor varies between 0.88 and 0.94. From load point of view, the power is distributed evenly on the three phases of the distribution system.

General conclusions of the measurements

According to the scheme of the distribution system of consumer, the installed power of each bus is much higher than recorded during the measurements of powers, is not an oversize, but that the measurements were carried out during a period in which the consumer is not functioning at maximum capacity [11].

4.2. Alignment of industrial consumer to specific standards

In Romania, and not only, to maintain the quality of electrical power is the responsibility of the supplier and the consumer, the latter one having the obligation to fit within the disturbance limits imposed by the standards.

Worldwide there are many organizations and institutions which draw up and establish technical standards. The most important ones are:

- ISO – International Standard Organization;
- CEN – Committee European de Normalization;
- ASRO - Romanian Institute of Standardization which working in the electrical field via ANRE (National Regulatory Authority in Energy). This is a national institution.

To compare the performance of the consumer with the requirements of standards and to analyze the parameters, monitoring will be done in detail for the mainline with the largest unbalanced regime, namely number four main distribution line to GDS4 (fig. 2.10).

For a better interpretation of the data and the consumer characteristics, monitoring and data acquisition were made over a period of 20 hours, during which the consumer has had several operating regimes

System acquisition and data analysis consist in the device described above (quality analyzer from Fluke) and a software for data modeling, "*Power Log*" also developed by Fluke.

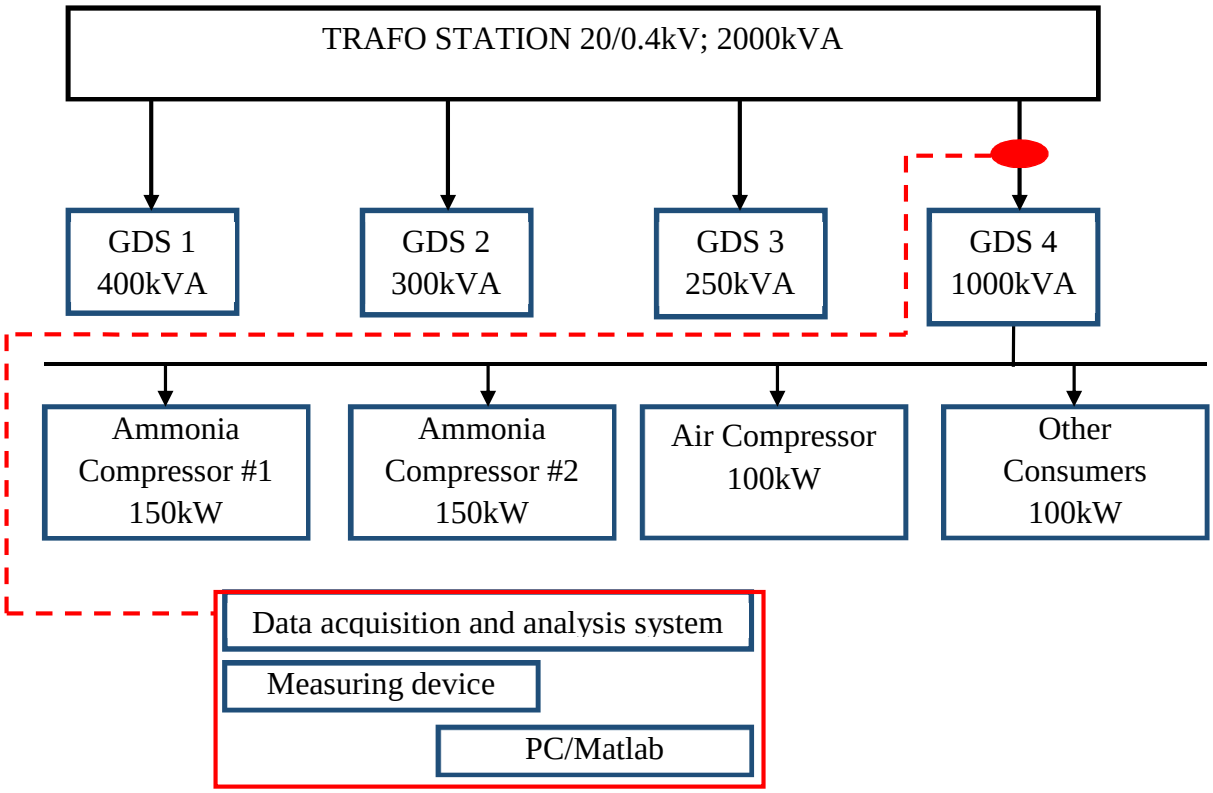


Fig. 2.10. Block diagram of industrial consumer distribution system

The measuring device is connecting to the computer via a USB (universal serial bus) and with the assistance of the software, → Power Log, all registered parameters are transferred in a database.

With the database created, the software Power Log can display under very many the registered parameters, can create graphs in various forms, and export reports in "excel" format (.xls) [12].

4.2.1. EN 50160 regulations concerning the voltage characteristics of distribution networks

The EN 50160 Standard [13] refers to parameters of voltage and permissible deviation at the point of connection between the consumer and the national distribution network. The standard refers to low voltage (LV), with the maximum voltage of 1000 V and medium voltage (MV) with a maximum voltage of 35 kV line, however in normal operating conditions [14].

In Table 2.1 are compared the measured values with the values imposed by the EN 50160 standard.

Table 2.1. Comparison of measured parameters with limitations imposed

Type of parameter monitored	**Acceptable limits**	**Measured values**	**Observations**
Voltage variations	380 V± 10%	Min. value = 378 V Max. value = 396 V	**In the limits imposed**
Frequency of voltage	49,5 Hz - 50,5 Hz	Min. value = 49,89 Hz Max value = 50,07 Hz	**In the limits imposed**
Unbalance	in general 2 %, occasional 3 %	Approx. 0%	**In the limits imposed**
THD_U	< 8 %	Max. value = 5,13 %	**In the limits imposed**

4.2.2. Electromagnetic compatibility regulations of international standards specific to industrial consumers

Regulations concerning the deforming regime of IEC 61000-3-4 standard

The IEC 61000-3-4:2007 standard [15] treats the harmonic current emissions limits in distribution networks of low voltage equipment with rated current greater than 16 A,

In Table 2.2 measured values are compared with the limits and values imposed by the IEC 61000-3-4:2007 standard.

Table 2.2. Evaluation of parameters in accordance with IEC 61000-3-4:2007 standard.

Type of parameter monitored	**Acceptable limits**	**Measured values**	**Observations**
THD_I	< 16 %	Max. value = 14,2 %	**In the limits imposed**
Harmonic of rank 3	< 21,6 %	Max. value = 0,5 %	**In the limits imposed**
Harmonic of rank 5	< 10,7 %	Max. value = 4,8 %	**In the limits imposed**
Harmonic of rank 7	< 7,2 %	Max. value = 2 %	**In the limits imposed**
Harmonic of rank 9	< 3,8%	Max. value = 0,2 %	**In the limits imposed**
Harmonic of rank11	< 3,1%	Max. value = 4 %	**Out of the limits imposed**
Harmonic of rank 13	< 2%	Max. value = 2,1 %	**Out of the limits imposed**

Regulations concerning the deforming regime of IEC 61000-2-4 standard

The IEC 61000-2-4:2002 standard [16] treats conduction disturbances of low frequency (0-9 kHz), indicating levels of compatibility of industrial distribution networks and other networks for the distribution of electrical energy (up to 35 kV) excluding public networks.

For long-term effects, levels of compatibility for voltage harmonics and distortion coefficient for total THD are given in Table 2.3.

Table 2.3. Levels of compatibility of IEC 61000-2-4 standard

Type of parameter monitored	**Class 1**	**Class 2**	**Class 3**	**Measured values**
THD_U	7,5 %	12 %	15 %	5,13 %
Harmonic of rank 3	4,5 %	7,5 %	9 %	0 %
Harmonic of rank 5	4,5 %	9 %	12 %	0 %
Harmonic of rank 7	4,5 %	7,5 %	10,5 %	0 %
Harmonic of rank 9	2,25 %	2,2 %	3,75 %	0 %
Harmonic of rank11	4,5 %	5,25 %	7,5 %	0 %
Harmonic of rank 13	4,5 %	4,5 %	6,75 %	0 %

The industrial consumer, subject of this paper is framed in the 3rd class, in terms of electromagnetic compatibility, but its distorted regime is very little influenced by the amplitude of the voltage harmonics being 0% of the fundamental amplitude. Following the evaluation of the measurements and the comparisons of parameters monitored with the values imposed by the specific regulations and standards, it can be concluded the fact that the distorted regime of the industrial consumer is moderate, but still allows quite a lot of improvements.

CHAPTER III
NUMERICAL ALRGORITHMS FOR MODELLING THE CHARACTERISTICS OF A LARGE INDUSTRIAL CONSUMER

6.1. Polynomial modelling of the *U(I)* characteristic for the industrial consumer

To better understand the way in which the industrial consumer analyzed behaves, will model the operating characteristic *U(I)*, specific to this consumer, in different operating regimes. The function *U(I)* is obtained by removing the variable time of two functions *U(t)* and *I(t)*, specifics to consumer. To modeling the characteristics of the large industrial consumer presented in this paper, polynomial regression function used is **"cftool"**.

During monitoring, the consumer has different regimens in terms of variation of the load, which means the use of different equipment and technological flows. Once all the data have been obtained and analyzed, were identified and chosen 7 different intervals of 15 minutes each, to be analyzed and modeled. These intervals are framed in terms of the variable time shown in Fig. 3.1.

Consumers for each interval are listed in Table 3.1.

Table 3.1. Specific types of consumers for each interval

Interval	The type of consumers	Notes on operation
1	2x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Smooth with low energy demand at the end of the interval. PID controllers do not offer the best stability
2	2x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Release the power controlled by PID for ammonia system
3	4x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Automated system of ammonia decided to start two more engines
4	4x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Operating at high capacity. PID controllers do not offer the best stability
5	4x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Unstable process with some stops on the motor directly connected
6	4x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	A trend without any problems with a very stable process given PID
7	1x50 kW motors, controlled VSD 1x100 kW motor controlled VSD 1x35kw motor connected directly	Oscillations at the request of power of air compressor

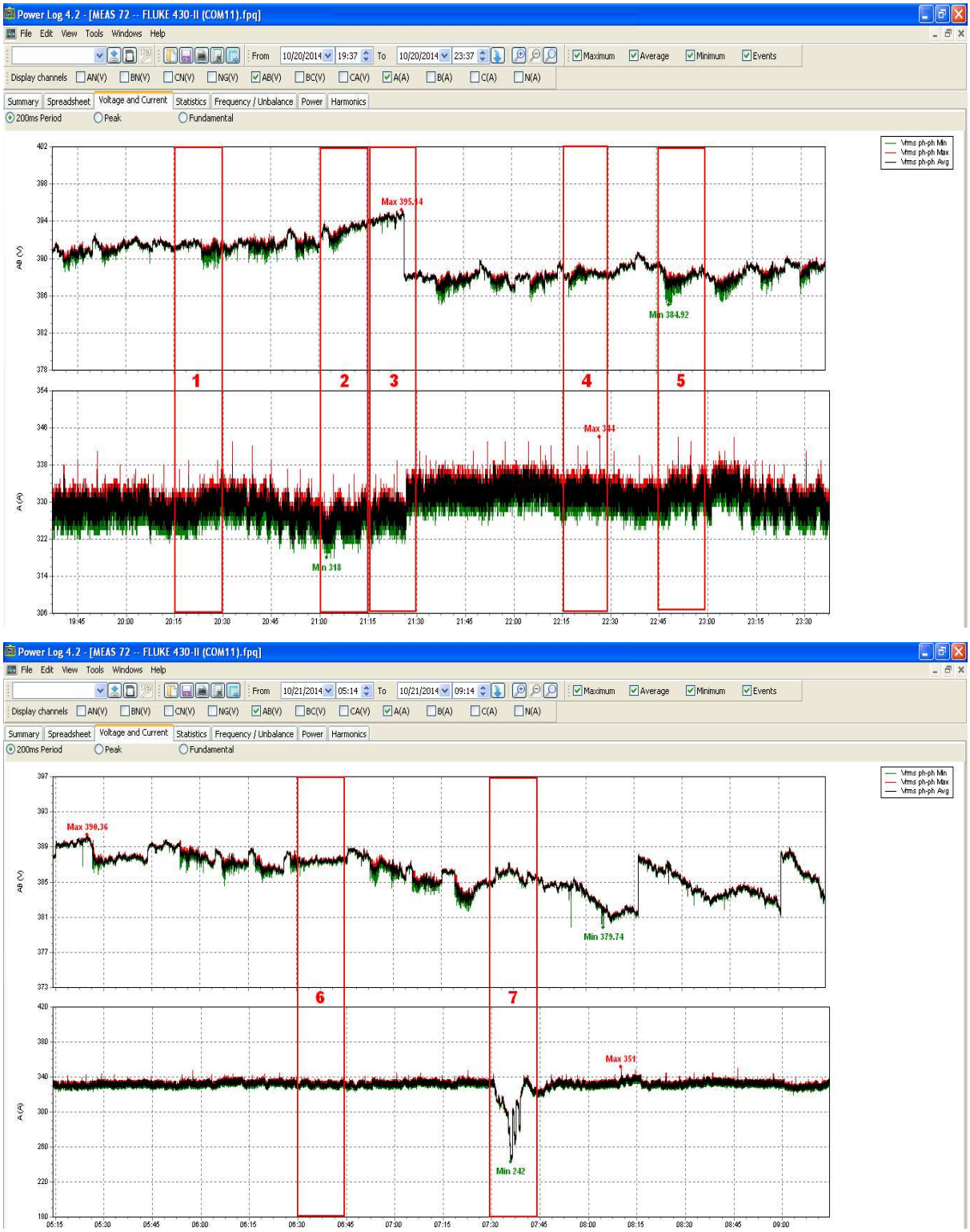


Fig. 3.1. The marking of intervals for analysis

On the other hand, these specific intervals, describe the various technological processes of the factory, each of them putting their footprint on the quality of electrical power and on the efficiency of energy consumption.

As I mentioned above, a polynomial function of a higher order does not guarantee a better outcome, so after the first 7 polynomial functions, they are evaluated to determine the most reasonable approximation ("best fit") [17].

As a result of numerous studies and analyses showed that the statistical parameters that can be used to assess the most suitable waveform of a polynomial functions are [17] [18] [19]:

- R-Square,
- adjusted R-Square,
- root mean squared error - RMSE,
- the sum of squares due to error - SSE.

Polynomial modeling of first interval

For first interval, as was mentioned above, by removing the variable time from the function *u(i,t)*, has been obtained function *u(i)*. This was possible because during the period of the measurements at each time period were recorded simultaneously mean values for voltage and current. Thus, if it was not talking about instantaneous values, the function *u(i)* becomes *U(I)*. In Fig. 3.2 are presented the values and the graph of the function *u(i,t)* used to obtain the function *U(I)*.

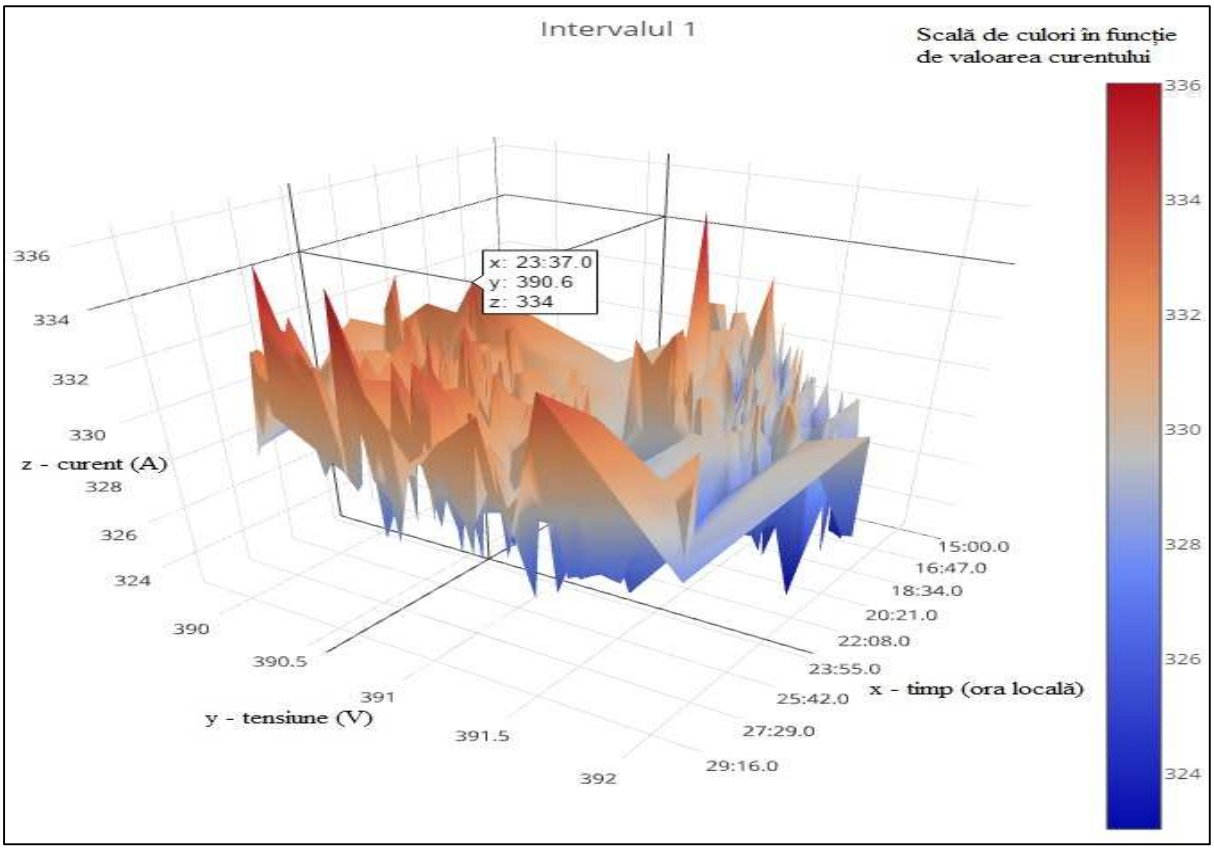


Fig. 3.2. 3D graph for the function *u(i,t)* in mesh format

The function *U(I)* specific to first interval is represented by points that can be visualized in Fig. 3.3, and according to legend, are presented the polynomial approximations from order 1 to order 7.

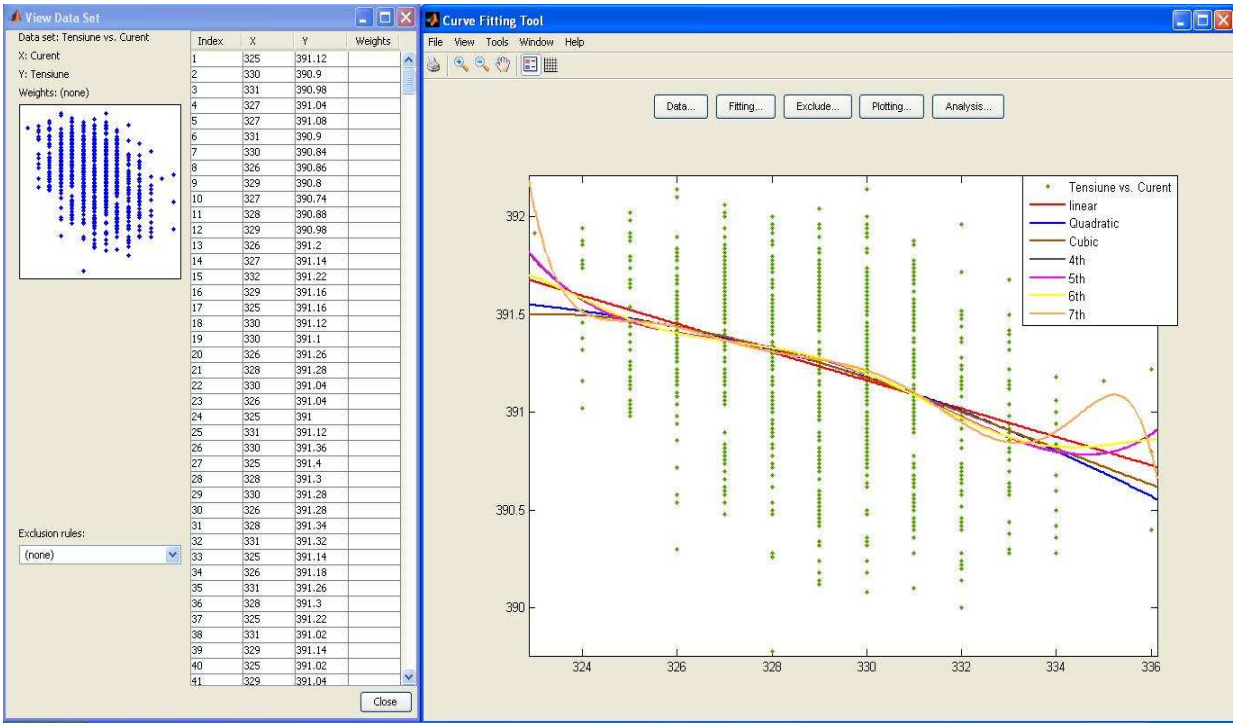


Fig. 3.3. The modeling of function *U(I)* for the first interval

Polynomial functions of the order of 1 to order 7 are described in Table 3.2.

Table 3.2. Polynomial functions *U(I)* for interval 1

Function	**Grade**
Poly1= − 0,1639x + 391,2	Linear
Poly2= − 0,01934x^2 – 0,1627x + 391,3	Quadratic
Poly3= 0,003314x^3 – 0,02042x^2 – 0,1712x + 391,3	Cubic
Poly4= 0,009054x^4 – 0,003995x^3 – 0,06216x^2 – 0,1563x + 391,3	4
Poly5= − 0,0001467x^5 + 0,009238x^4 − 0,00299x^3 – 0,06282x^2 – 0,1575x + 391,3	5
Poly6= − 0,001076x^6 + 0,001189x^5 + 0,01894x^4 – 0,009659x^3 – 0,08219x^2 – 0,1521x +391,3	6
Poly7= − 0,002933x^7 + 0,002332x^6 + 0,03374x^5 – 0,00446x^4 – 0,1038x^3 – 0,04506x^2 – 0,09102x + 391,3	7

The use of confidence intervals for coefficients, is helpful in evaluating and comparing the resulting curve. The clarity of these coefficients shall be determined by confidence intervals and when they are considerably different then they induce uncertainty. If in some models, the coefficients appear equal zero, then they don't help the evaluation of modelling. For this paper, an interval of confidence of 95% was chosen.

As the next step, for each interval individually, it is constituting by the evaluating of the waveforms of the generated polynomial functions. This is done by evaluating the statistical parameters (Table 3.3) of evaluation of polynomial waveforms [20].

Table 3.3 Statistical parameters for the model of first interval

Grade	**The name of the function**	**SSE**	**R-square**	**RMSE**	**Adjusted r-square**
linear	Poly1	146,3208	0,141817	0,403435	0,140863
quadratic	Poly2	145,7801	0,144989	0,402913	0,143085
cubic	Poly3	145,7455	0,145192	0,403089	0,142333
4	Poly4	145,0744	0,149128	0,402385	0,145329
5	Poly5	145,074	0,14913	0,402609	0,144376
6	Poly6	145,0336	0,149367	0,402778	0,143658
7	Poly7	144,4425	0,152834	0,402181	0,146193

In this case, the polynomial function most suitable is the one of order 7.

This was pretty easy to determine due to Gauss distribution of the raw data.

6.2. The final conclusions of modeling the seven intervals

Even as a result of such research, future solutions will not be easy to implement, as described in this paper, because even a study that uses Matlab program can leave the possibility of interpretation, because any set of raw data can coincide with almost any polynomial equation [21]. The study becomes much more efficiently and is more valuable if known in detail every consumer and if it is understood how the interpretation and the way each curve was approximated in the most appropriate manner [20].

CHAPTER IV
METHODS FOR ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION OF A LARGE INDUSTRIAL CONSUMER

4.5 Industrial Energy Efficiency

In a factory, the increasing of energy efficiency is done through the implementation of techniques and procedures of the management of energy. For energy efficiency or inefficiency there are not a specific unit of measure, these are approximated by multiple monitoring of energy performance indicators [22] [23].

This study deals with the methods for the optimization of energy consumption of industrial consumer referred to in the preceding chapters, consumer with distorted regime in the electrical distribution system.

The optimization methods of energy consumption studied are:

- ***Power factor compensation;***
- ***Filtering out the harmonics of current.***

4.6 Power factor compensation

Improvement of power factor helps at the increasing of the efficiency of the distribution system, ensuring a more efficient use of transport line by reducing the apparent power of the consumer. Basically with the improvement of the power factor, the value of the current is lower through the distribution network, the same network load [24].

The definition of power factor and the procedures for its interpretation have been the comprehensive study materials in the field of electrical engineering and energy. In our country, Professor Andrei Țugulea has developed new criteria for the analysis of the power factor, arguing for the introduction of limitations relating to allowable levels of power factor [25].

The simplest definition of power factor, is the one for sinusoidal regime, namely [25]:

$$k = \frac{P}{S} = \frac{UIcos\varphi}{UI} \tag{4.1}$$

Including the reactive power in relation, the power factor becomes:

$$k_p = cos\varphi = \pm\sqrt{1 - sin^2\varphi} = \pm\sqrt{1 - \frac{Q^2}{S^2}} \tag{4.2}$$

From mathematical point of view, the two relationships are identical, but from the physical point of view, each of which confers more meanings of power factor.

Generally, the power factor can be defined [25]:

$$k_p = \sqrt{1 - \frac{Q^2 + D^2}{S^2}} \tag{4.3}$$

4.7 Filtering of current harmonics

By removing as much as possible of the characteristic harmonics of a distorted regime, the energy consumption becomes more efficient and at the same time are removed the effects that have a negative impact on the quality of electricity [26] [27]. Harmonics filtering refers basically to eliminate as far as possible all waveforms, other than fundamental, present in the electrical distribution system [28] [29]. The main equipment with can help on the reducing of harmonics are insulation transformers, passive or active filters.

4.8 Optimizing the energy consumption of industrial consumer

The industrial consumer as was mentioned in previous chapters [30], is a FMCG (fast moving consumer good) factory located in the city of Ploiesti (Fig. 4.1).

Fig. 4.1. Unilever factory in Ploiesti

The method by which it tries to optimize energy consumption is based on reactive power compensation and harmonic filtering system on the distribution of the consumer.

The object of this research is the bus number 4 (Fig. 2.10) of the consumer line, which, as has been specified, it is the most important from the point of view of the distorted regime, the regime imposed by the type of consumers connected to this bus [31].

The compensation equipment shall be sized in relation to the level of reactive power and the value of harmonics that should be compensated, but also depending on the current load of receptor or even on the installed power of the respective bus, this where it has also to serve potential new consumers supplied from the line [32].

In collaboration with Electric Schneider, where analyzed all these parameters of this bus of the electrical distribution system, proposing one of active filtering equipment of *"AccuSine"* series. Based on reasoning method presented in Fig. 4.2, has been chosen as optimum active filter solution "AccuSine SWP" designed specifically for the consumer.

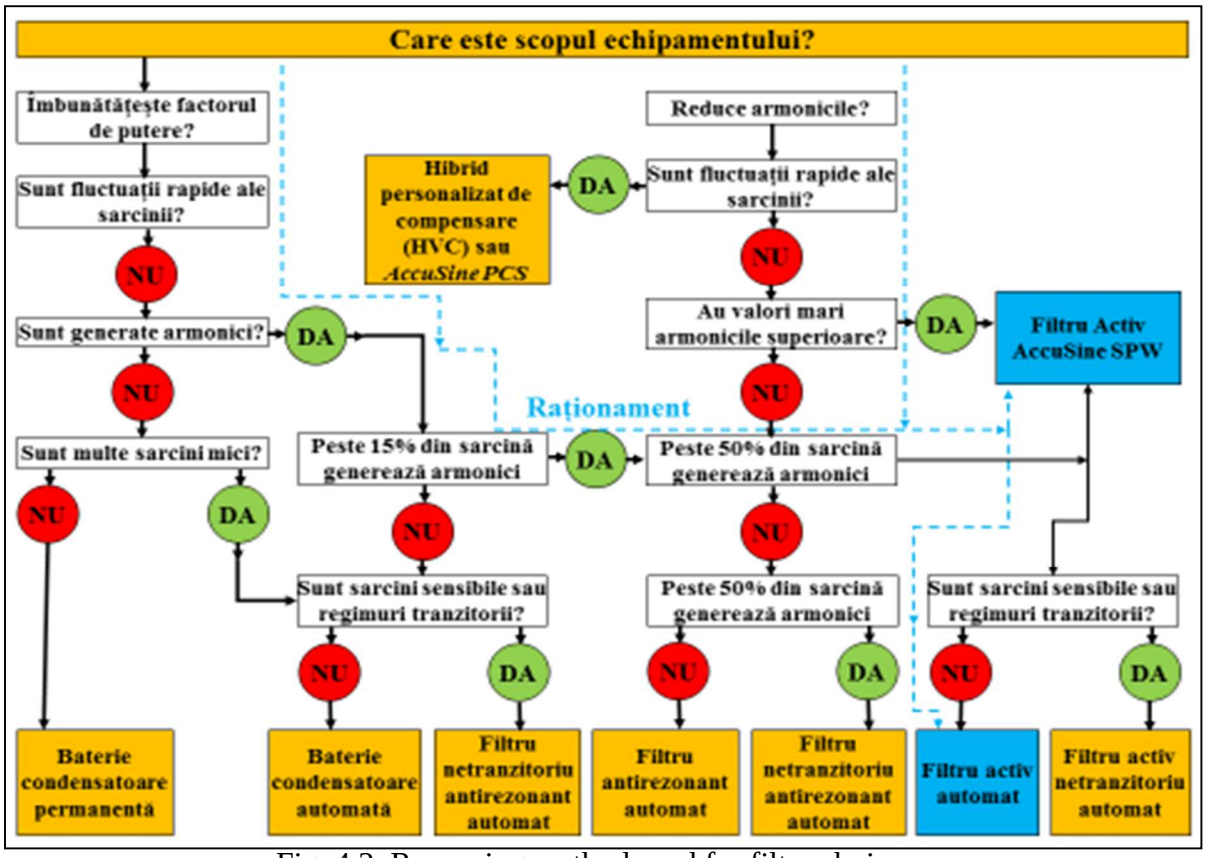


Fig. 4.2. Reasoning method used for filter choice

4.8.1 Checking performances after using the filter

Due to the fact that the majority of consumers is made up of three phase motors, line monitored is one well balanced from the point of view of the loading on each stage, and where appropriate, monitoring shall be carried out only on one of the phases [33]-[38].

To validate the results obtained after the installation of the compensation equipment, the consumer was monitored over a period of four hours before the filters were activated and four hours after the filters were started. Thus, it will be able to make comparisons between the two regimens of consumer, with or without the compensation equipment.

The characteristics of the main electrical parameters are compared below.

Harmonic spectrum of the network is rendered in Fig. 4.3 in initial condition and in Fig. 4.4 after it has been compensated.

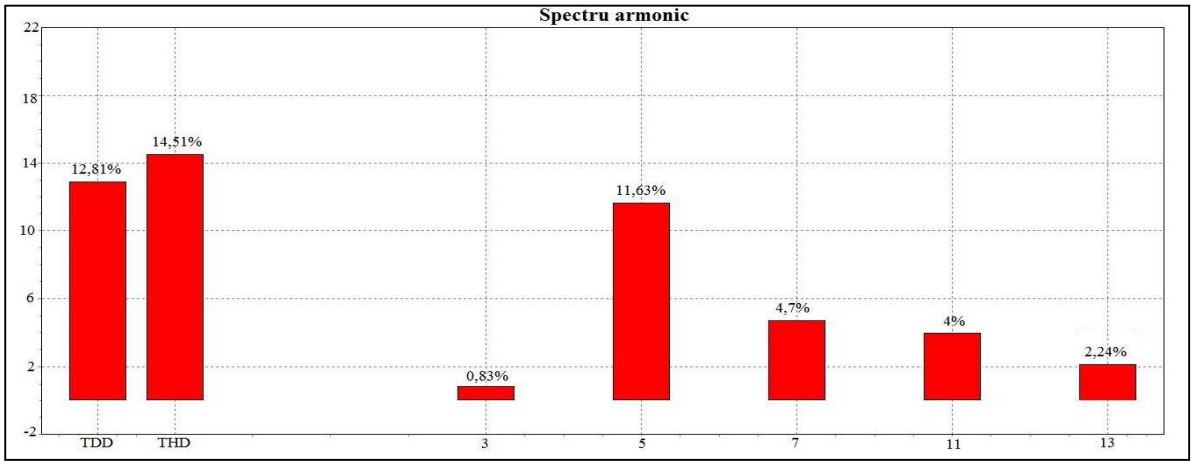


Fig. 4.3. Harmonic spectrum uncompensated

Harmonic spectrum above shows that the highest values are of the harmonics 5, 7, 11 and 13. These harmonics are specific to reverse sequence driving with the power electronics in general by the variable frequency drives with static converters in 6 pulses.

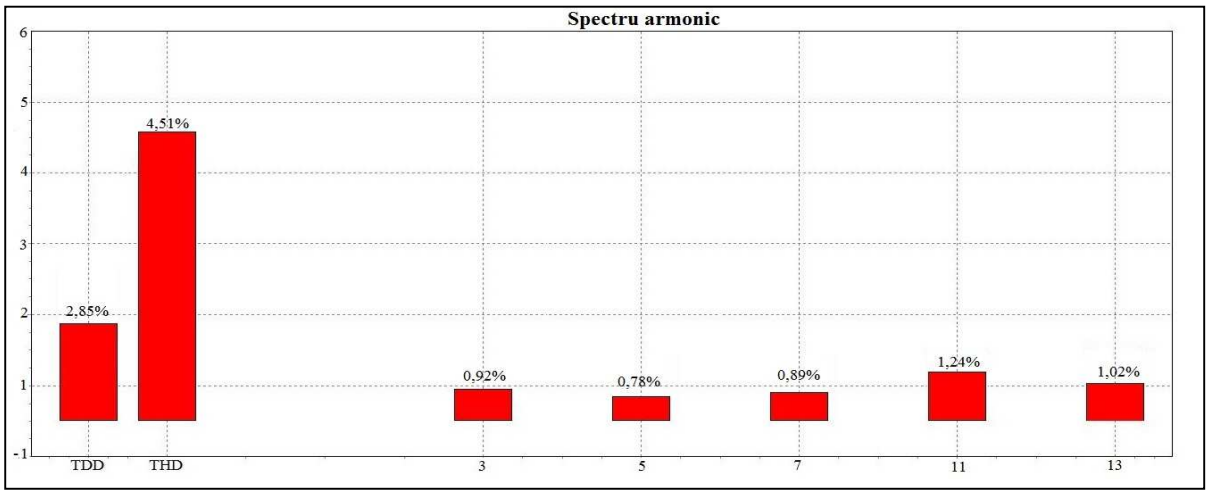


Fig. 4.4. Harmonic spectrum compensated

The strongest improvement took place in the current harmonic of rank 5, this being reduced from 11.63% to 0.78%.

For *the power factor* (Fig. 4.5), *reactive power* and *apparent power* were made sets of measurements, where for these parameters were monitored the evolution of them when the filter was started.

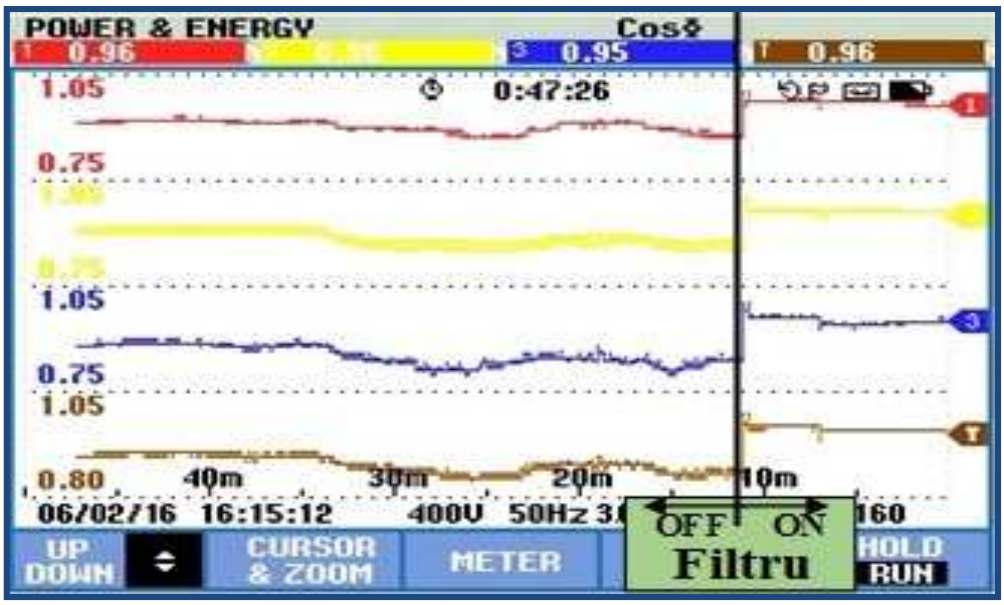


Fig. 4.5. Power factor evolution before and after the filter connection

As expected, *cosφ* was improved from 0.87 to 0.96. It is visible that for a very short period, immediately after activating the filter, *cosφ* reached 1. This value corresponds to the zero value of the reactive power produced for a short period of time after the activation filter. In conclusion, for a very limited time, the filter has transformed the consumer in a purely resistive one, but due to technical constraints, it could not maintain the same conditions for a longer period.

After comparing of the electrical parameters, result a clear improvement of them, which leads directly to the efficiency of the energy consumption of the consumer. Comparison of the values of these parameters is presented in Table 4.1. By comparing the values summarized in table, it can be concluded that the method of compensation is correct and the equipment used is well chosen.

Table 4.1. Values of the electrical parameters monitored

Monitored Parameter	**Values before mounting filters**	**After mounting the filter values**
Reactive power *	19.5 kVAR	5.6 kVAR
Apparent power *	123.1 kVA	121.6 kVA
Power factor cosφ	0.87	0.96
THD_U	4.73%	1.43%
THD_I	14.51%	4.51%
TDD	12.81%	2.85%
Harmonic of order 3	0.83%	0.92%
Harmonic of order 5	11.63%	0.78%
Harmonic of order 7	4.7%	0.89%
Harmonic of order 11	4%	1.24%
Harmonic of order 13	2.24%	1.02%

* the measurements have made on the consumer just before and after the filter activation

4.8.2 Comparison of mathematical models of the consumer before and after installing filter

The impact of compensation in the operation characteristic is performed by comparing the mathematical models of the consumer for both operating regimes, before and after starting the filter.

During the period of monitoring (4 hours without filter and 4 hours with filter) will choose 4 pairs of intervals, each pair being identical in terms of the operating regime. For each set of intervals, for consumer it will created a mathematical model, one for operation without filter and one for operation with the filter, and the models will be compared to each other.

These intervals are shown in Fig. 4.6 (with no filtering) and Fig. 4.7 (with filtering).

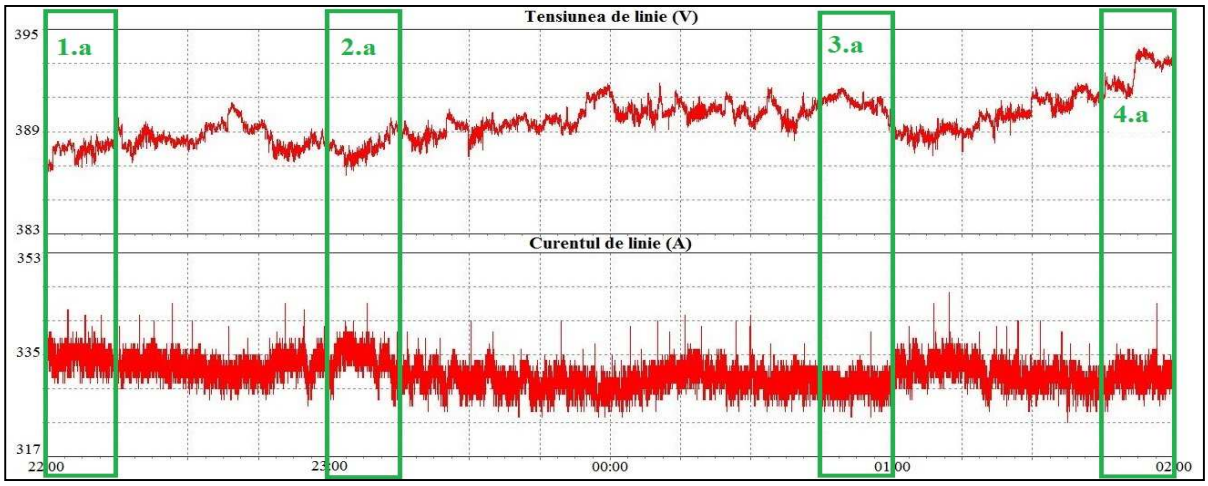


Fig. 4.6. The selection of intervals from the period without filtration

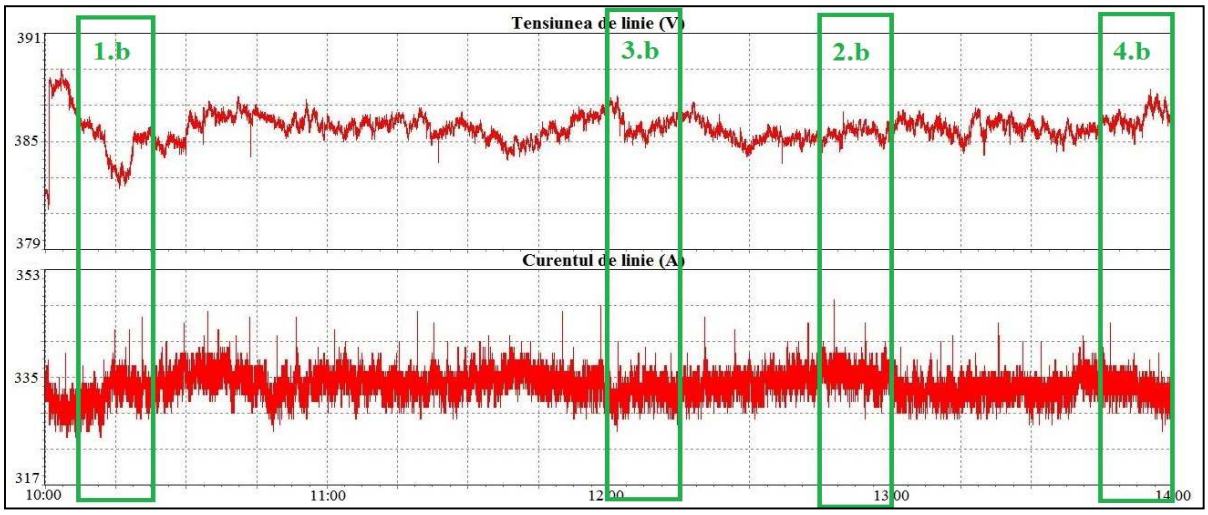


Fig. 4.7. The selection of intervals from the period with filtration

Thus, it will make mathematical models for each period, comparing models of intervals 1.a to 1.b, 2.a to 2.b, 3.a to 3.b and 4.a to 4.b.

Mathematical models for intervals 1.a and 1.b

Polynomial functions *U(I)* of the rank 1 up to rank 7 for the interval 1a are represented in Fig. 4, and the ones specific to interval 1.b are represented in Fig. 4.9.

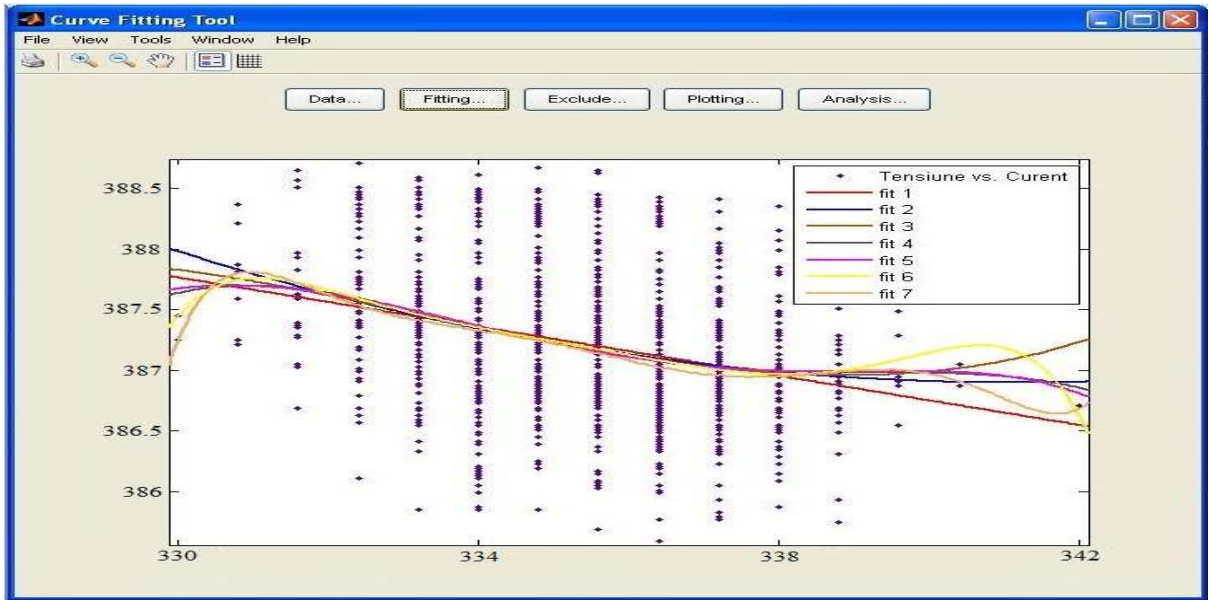


Fig. 4.8. The modeling of function *U(I)* for interval 1.a

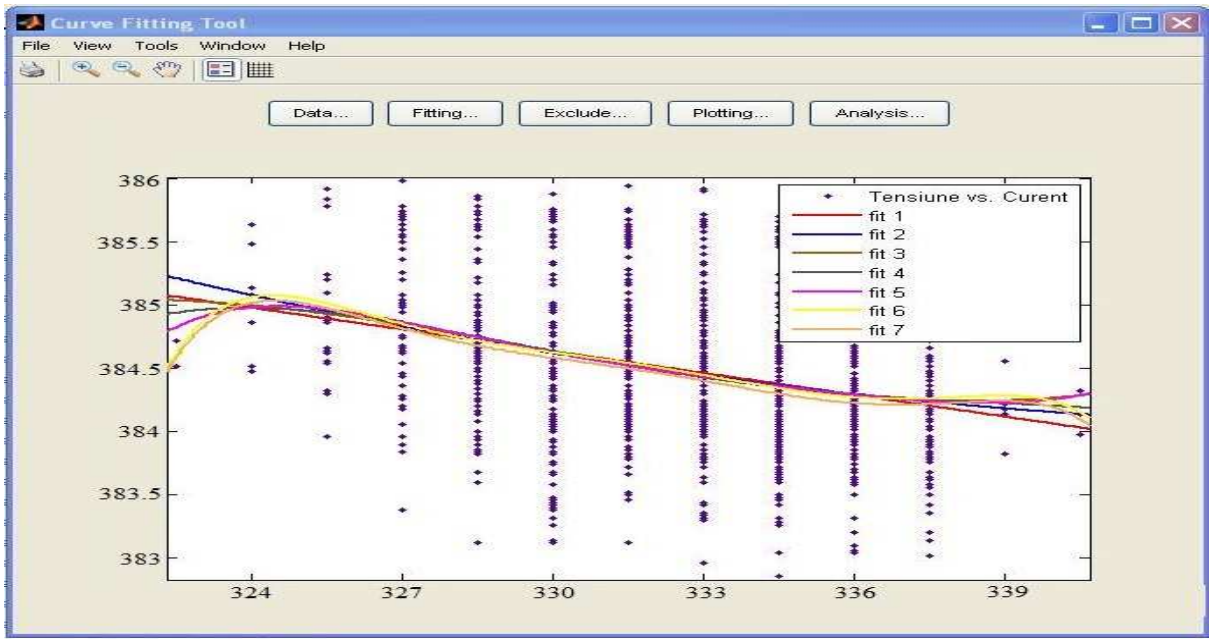


Fig. 4.9. The modeling of function *U(I)* for interval 1.a

By comparing the waveform for the two mathematical models, it can be observed that the specific waveform of interval 1.b are more linear.

The statistical parameters value of curves approximation for the two intervals are shown in Table 4.2

Table 4.2. The values of the statistical parameters of the intervals 1.a and 1.b

Grade	Parameters of interval 1.a				Parameters of interval 1.b			
	SSE	R-square	RMSE	Adjusted R-square	SSE	R-square	RMSE	Adjusted R-square
linear	334,8	0,08918	0,6106	0,08817	333,5	0,09262	0,6095	0,09161
quadratic	333,4	0,09306	0,6096	0,09104	333	0,09408	0,6093	0,09408
cubic	333	0,09409	0,6096	0,09105	332,6	0,09509	0,6093	0,09206
4	332,6	0,0952	0,6096	0,09116	332,5	0,09533	0,6096	0,09129
5	332,6	0.09523	0,6099	0,09017	332,4	0,09566	0,6098	0,0906
6	332	0,09079	0,6097	0,09079	331,9	0,09723	0,6096	0,09216
7	332,1	0,09572	0,6011	0,09161	333,6	0,09256	0,6115	0,08544

The evaluation of these parameters indicates the polynomial function that approximates most closely to the consumer characteristic is the one rank 7 for interval 1.a (with no filtering) and the one of rank 6 for interval 1.b(with filtering).

These 7 polynomial functions specific to the two intervals are shown in Tables 4.3 and 4.4.

Table 4.3. Polynomial function *U(I)* for interval 1.a

Function	Grade
Poly1 = $-0{,}1606x + 387{,}8$	Linear
Poly2 = $0{,}03493x^2 - 0{,}1321x + 387{,}8$	Quadratic
Poly3 = $0{,}00884x^3 + 0{,}02945x^2 - 0{,}2971x + 387{,}8$	Cubic
Poly4 = $-0{,}01013x^4 + 0{,}01883x^3 + 0{,}04703x^2 - 0{,}1093x + 387{,}8$	4
Poly5 = $-0{,}00129x^5 - 0{,}01588x^4 + 0{,}02149x^3 + 0{,}03213x^2 - 0{,}2245x + 387{,}8$	5
Poly6= $-0{,}002228x^6 + 0{,}002348x^5 + 0{,}02401x^4 + 0{,}00131x^3 - 0{,}01055x^2 - 0{,}2103x + 387{,}8$	6
Poly7= $0{,}00111x^7 - 0{,}00357x^6 - 0{,}01146x^5 + 0{,}04015x^4 + 0{,}05015x^3 - 0{,}02713x^2 - 0{,}2374x + 387{,}8$	7

Table 4.4. Polynomial function *U(I)* for interval 1.b

Function	Grade
Poly1 = $-0{,}2016x + 388{,}1$	Linear
Poly2 = $0{,}03173x^2 - 0{,}1881x + 388{,}1$	Quadratic
Poly3 = $0{,}01014x^3 + 0{,}03165x^2 - 0{,}1946x + 388{,}1$	Cubic
Poly4 = $-0{,}00541x^4 + 0{,}01213x^3 + 0{,}06012x^2 - 0{,}2179x + 388{,}1$	4
Poly5 = $-0{,}00055x^5 - 0{,}00488x^4 + 0{,}01661x^3 + 0{,}05801x^2 - 0{,}2251x + 388{,}1$	5
Poly6= $-0{,}00249x^6 + 0{,}00199x^5 + 0{,}02441x^4 + 0{,}00131x^3 - 0{,}01005x^2 - 0{,}2101x + 388{,}1$	6
Poly7= $0{,}00113x^7 - 0{,}00369x^6 - 0{,}01171x^5 + 0{,}03319x^4 + 0{,}04828x^3 - 0.03001x^2 - 0{,}2434x + 388{,}1$	7

4.8.3 Economical and financial calculation for implemented solution

To analyze the effectiveness of the proposed solution to optimize energy consumption have made records of energy consumption for two months from April-June 2016, which is compared to that recorded in the same period of the previous year. These data are shown in Table 4.5, and the graphics on Fig. 4.10.

Table 4.5 The analysis of energy consumption of industrial consumer

	2015 (April - May)	2016 (April-May)
Energy consummate (KWh)	116739	113704
Production (t)	4578	4987
Consume (KWh/t)	25,5	22,8

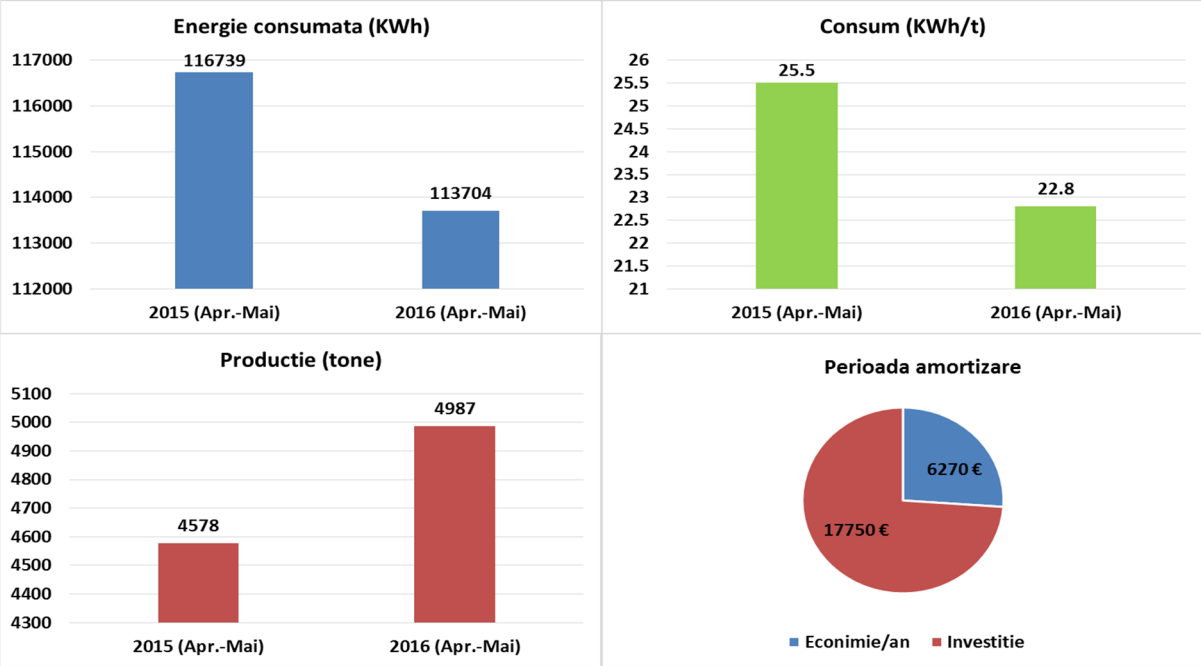


Fig. 4.10. Economic and financial charts

According to the data from the table above, after the filter installation, the consumption per ton of finished product (margarine) decreased by 2.7 per KWh, while reporting this economy at the 4987 tons of margarine products in those two months, a massive amount of energy was saved 13464 KWh.

The price of electricity is approximately 350 lei per 1 GW, thus equating in money of those GW 13.64 saved is the sum of 4712 lei for a period of two months.

The total amount of the investment was EUR 17750 and considering at every two months 1045 euro saving, it follows that the period of depreciation of the investment will be about 34 months.

CHAPTER V
ORIGINAL CONTRIBUTIONS AND CONCLUSIONS

Starting from idea that in order to improve substantially a process, is needed to do in-depth investigations and studies, I consider it a great advantage if it were known from the outset what characteristic, what type and how it is classified a consumer in relation to energy standards, all these to optimize energy consumption and at the same time in order to negotiate better prices and to avoid penalties.

For the industrial consumer analyzed there is a big competition in the same branch of activity, and better management of resources and a higher level of energy efficiency become mandatory targets in order to remain competitive.

This thesis analyzes the industrial consumer in terms of operational regimes, aimed at reducing the energy consumption by lowering reactive power consumed and by compensating harmonic spectrum from the electrical distribution system of the consumer.

As a result of my own analyses and researches have resulted the following contributions:

- I analyzed the specific power regimes of operation of the consumer, on the basis of a study of a large number of references from literature.
- Were monitored and analyzed electro energetic parameters of industrial consumer on two of main lines of electricity distribution. On the basis of the references, the consumer has been likened to specific standards in the field of transport and distribution of electricity.
- Based on the analysis of the bus with the deepest distorted regime, I have created mathematical models for the consumer on the different periods of time during which the consumer has gone through different operating regimes. Mathematical models have had based on polynomial regression, and mathematical calculation was done in Matlab, polynomial functions were generated up to the order of seven. The resulting waveforms have been assessed using the assessment statistics parameters, thus resulting characteristics of instantaneous values $u(i)$ and mean values $U(I)$ as close as possible to the actual measured data.
- On the basis of the references have been analyzed methods of optimizing the energy consumption of the consumer. Have been assessed methods of reactive power compensation and harmonic filtering methods.

- On the basis of analyses and measurements has been chosen as the method of optimization of energy consumption, the installation on distribution line number four, a compensation equipment consists of two active filters. The filters have been specially designed by Schneider Electric, based on parameters monitored.
- Methods have been developed to compare the operation characteristic of the consumer in both situations, before and after the installation of the equipment for compensation. The method is based on a mathematical model developed by polynomial regression with consumer behaviors were compared, with and without active filters.
- It was analyzed the efficiency of compensating solution from economic point of view, by making a financial calculation that have attested the benefits of the implementation of the proposed solution.

Development directions

The effects of distorted regime represent a growing concern in managing electrical distribution networks, significant savings can be achieved through improving the quality of electric energy. A very important step in obtaining such benefits, is understanding the requirements and limitations of the system. Therefore, local conditions of exploitation must be reviewed before implementing a solution, it is compulsory to analyze network distorted regime but also the knowledge of the standards and regulations.

The development of industrial technology causes major disturbance that leading to lower levels of electricity quality. In order to improve the quality of energy, companies investing huge amounts of money, and better management of resources and a higher level of energy efficiency become mandatory targets in order to remain competitive. Passive Filtering is still the most economical solution, but with an average performance, high performance can be achieved only with the help of the latest technologies, including active filters with an indication that they are more expensive than passive ones.

The next steps of the research will focus on the development of predictive algorithms used in the energy management system, in order to predict with greater accuracy the electricity consumption. In this way the company will be able to purchase an exact amount of energy, this to avoid any penalties imposed by the actual regulations.

BIBLIOGRAFY

[1] Iacobescu, GH., Iordănescu, I., Tudose, M. – *Reţele şi sisteme electrice*. Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1979

[2] Ungureanu, M., - *Analiza prin modelare şi simulare a calităţii energiei în medii de utilizarea energiei electrice*. SNCEE Târgovişte, 2003

[3] Lazar, S., Roşca, M., - *Note de curs „Calitatea energiei electrice”*

[4] Hermina, A., Golovanov, N., Răşcanu, V., Păun, D., Păun, C., – *Sistem de monitorizare al calităţii serviciului de furnizare a energiei electrice în concordanţă cu reglementările din România*, Lucrările ştiinţifice ale Forumului Regional al Energiei, Neptun, Iunie 15-19, 2008

[5] Emil, C., Iosif, V.N., Sergiu, C. – Low Voltage Power Quality at the Level of Harmonics - An Educational Perspective, EEA, 2011

[6] Popescu, S., Stan, C., Sotri, S., Cîrstea, D., - *Optimizări în reţelele electrice*. Ed. Macarie, Târgovişte, 2003

[7] Toader, C., Postolache, P., Porumb, R., – *Influenţa factorilor de nesimetrie asupra pierderilor de putere şi energie electrică ale liniilor electrice în regim armonic nesimetric*. SNCEE Târgovişte, 2011

[8] Albert, H., Mihailescu, A., Iancu, A. – *Aspecte privind consumul de energie activă aferent consumului suplimentar de energie reactivă în raport cu factorul de putere neutral*. Buletin ISPE nr. 3, 1999

[9] Andrei, H.; Cepisca, C., Spinei, F. – *The modelling of the power factor in steady state non sinusoidal regime with Mathcad techniques*. International Conference on Automation Quality and Testing, Cluj Napoca, 2006

[10] PE 124/95 - Normativ pentru stabilirea soluţiilor de alimentare cu energie electrică a consumatorilor industriali şi similari

[11] **Oprea, G. - *Regimuri electroenergetice și mărimi caracteristice,* Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgovişte, 2014.**

[12] http://www.powercet.com/uploads/files/fluke_powerlog_users_manual.pdf

[13] EN 50160:1999 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems“;

[14] Markiewicz, H., Klajn, A.: ”Voltage Disturbances, Standard *** EN 50160 – Voltage Characteristics în Public Distribution Systems”, Wroclaw University of Technology, 2004,

http://www.cda.org.uk/megab2/elecapps/PQ_Guide/542-standard-EN-50160-voltagecharacteristics- in.pdf (tradus în http://www.sier.ro/Articolul_5_4_2.pdf)

[15] SR EN 61000-6-4:2003 ”Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 6-4: Standarde generice. Standard de emisie pentru mediile industriale”

[16] EN 61000-2-4:2002 ”Electromagnetic compatibility (EMC). Environment. Compatibility levels în industrial plants for low-frequency conducted disturbances”;

[17] S. Lynch, Dynamical Systems with Applications using MATLAB. Birkhäuser, 2004.

[18] Breaz N., Crăciun M., Gașpar M., Paraschiv-Munteanu I. – Modelare prin matlab, POSDRU/56/1.2/S/32768, 2011

[19] A.J.M. Ferreira, MATLAB Codes for Finite Element Analysis, Springer. 2009.

[20] **Oprea, G. -** ***Sisteme de măsurare, achiziție și modelare numerică a caracteristicilor unui mare consumator industrial*****, Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgoviște, 2015.**

[21] IEEE Std. 112-1991, ”Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.“

[22] Arrillage, J., Watson, N., Chen, S. – *Power System Quality Assessment,* John Wiley & Sons, New York, 2001.

[63] Andrei, H., Cepisca, C., Grigorescu, S.D. – *Power Quality and Electrical Arc Furnaces,* pp. 55-100, chapter 2 of the book *Power Quality***,** InTech, Wien, 2011.

[24] Baggini, A. – *Handbook of power quality*, John Wiley & Sons, Ltd, England, 2008

[25] Tugulea, A. - *Consideratii referitoare la definirea factorului de putere pentru sisteme trifazate dezechilibrate*, Energetica , Nr. 4, 1986;

[26] L.O. Chua, A. Ushida, - *Algorithms for computing almost-periodic steady-state response of nonlinear systems multiple input-frequencies*, IEEE. Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS 28, pp. 953/971, 1981.

[27] A.P. Schwartz, - *Computer aided design of microelectronic circuit and system*, Academic press, London, 1987.

[28] H.Andrei, D. Popovici, - *Algoritmus zum bestimen demy frequenz spekter bei den nichtlinearen kreiselement im periodische nichtsinusformigem regime*, Politehnica University of Bucharest, Scientific Bulletin, series C Electrical Engineering, vol. 60, number 3-4, pp.133-139, 1998.

[29] ARTINEK,P.-DAŠA, T. Evolutionary algoritmes by ARC filter synthesis. ECCTD 05, Cork,2005,pp.155- 159.

[30] **Oprea G.** ***Implementation of ISA S88.1 standard into an automated process,*** **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2013, Nr4, p. 16-20, ISSN1843-6188**

[31] Balan, G., Pencioiu, P., Golovanov, N. – Probleme actuale privind calitatea energiei electrice în sistemele electroenergetice, ICEMRAD, 2012

[32] HÁJEK, K. - SEDLÁČEK, J.: Lossy LC Ladder Prototypes and their use for ARC Filter Optimization. WSEAS TRANSACTIONS on ELECTRONICS, Issue3, Volume2, July 2005, pp. 94-99,ISSN 1109- 9445

[33] **Oprea, G. -** ***Metode de optimizare a consumurilor energetice ale unui mare consumator industrial,*** **Raport de cercetare doctorală, Universitatea Valahia Târgoviște, 2016**

[34] **Oprea G. -** ***Measurement analyzes of a large industrial consumer,*** **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2014, Nr.1, p.48-55, ISSN1843-6188**

[35] **G. Oprea, H. Andrei -** ***Measurement data analysis of power quality for industrial loads,*** **Proc of IEEE-Advanced Topics in Electrical Engineering -ATEE, 2015, paper SIMOP P8 ISSN 2068-7966, indexat ISI**

[36] **H. Andrei, P.C. Andrei, G. Oprea, B. Botea -** ***Basic Equations of Linear Electric and Magnetic Circuits in Quasi-stationary State Based on Principle of Minimum Absorbed Power and Energy,*** **Proc. IEEE-ISFEE, Bucharest, 2014, Pp 16, ISBN 978-1-4799-6820-6, indexat IEEE Explore**

[37] **Oprea G., Andrei H. -** ***Power Quality Analysis of Industrial Company Based on Data Acquisition System, Numerical Algorithms and Compensation Results,*** **Proc of IEEE - ISFEE 2016, 30 June -1 July, paper #148-POS15**

[38] **Oprea G., Andrei H. -** ***The optimization of energy consumption for an industrial consumer,*** **Proc of IEEE - ECAI 2016, paper #52-POS15**