

## АЛГОРИТЪМ ЗА ОЦЕНКА НА ОСНОВНИ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ С МИКРОПРОЦЕСОРЕН АНАЛИЗАТОР

**Сидер Сидеров**

**Николай Матанов**

**Борислав Бойчев**

**Вълчан Георгиев**

ТУ-София  
София 1756  
бул. Кл.Охридски, 8  
ЕФ, Катедра "ЕСЕОЕТ"  
E-mail:  
ssiderov@tu-sofia.acad.bg

ТУ-София  
София 1756  
бул. Кл.Охридски, 8  
ЕФ, Катедра "ЕСЕОЕТ"  
E-mail:  
matanov@bitex.com

ТУ-София  
София 1756  
бул. Кл.Охридски, 8  
ЕФ, Катедра "ЕСЕОЕТ"  
E-mail:  
bojchev@tu-sofia.acad.bg

ТУ-София  
София 1756  
бул. Кл.Охридски, 8  
ЕФ, Катедра "ЕСЕОЕТ"  
E-mail:  
vultchy@tu-sofia.acad.bg

### РЕЗЮМЕ

В доклада е представен алгоритъм за определяне на основни показатели на електромагнитна съвместимост (ЕМС), като хармоничните и несиметричните съставки, коефициентите на несинусоидалност, несиметрия, неуравновесеност на напрежението и тока в характерни възли на електроенергетични системи, запазващи смущаващи големи товари. Алгоритъмът е предназначен за микропроцесорен анализатор за контрол на електромагнитната съвместимост в електроенергетични системи. Освен това той ще позволява да се провежда изследователска работа по усъвършенстване на методите и точността на оценка на електромагнитната съвместимост.

Предложеният в тази статия алгоритъм за определяне на основни показатели на електромагнитната съвместимост (ЕМС) в електроенергетични системи е предназначен да се ползва в микропроцесорен анализатор на ЕМС, разработен от авторите. Структурната схема и функционалните възможности на анализатора са разгледани в Сидеров *и др.* (2003).

### ОСНОВНИ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЕМС

В действителност основните показатели на ЕМС в електроенергетични системи (ЕС), дефинирани в стандартите и Шидловский *и др.* 1977, са качествените показатели на електрическата енергия, свързани с оценката на несинусоидалността на тока и напрежението, несиметрията в трифазните системи на тока и напрежението, неуравновесеността в трифазна система, отклонението и колебанието на напрежението.

Основните характеристики на несинусоидалността на тока и напрежението са:

- коефициенти на хармониците на тока и напрежението:

$$k_{Iv} = I_{v*} = \frac{I_v}{I_1} \cdot 100, \%;$$

$$k_{Uv} = U_{v*} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100, \%;$$

- коефициента на несинусоидалност (общо изкривяване на хармониците) на напрежението и тока:

$$k_{нсU} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{v=2}^{50} k_{Uv}^2}, \%;$$

$$k_{нсI} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} I_v^2}}{I_1} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{v=2}^{50} k_{Iv}^2}, \%;$$

- претеглени коефициенти на несинусоидалност само на напрежението за индуктивност и за кондензатори:

$$k_{нс,ind} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} \left( \frac{U_v^2}{v^\alpha} \right)}}{U_1} \cdot 100, \%;$$

$$k_{нс,cap} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} (v U_v)^2}}{U_1} \cdot 100, \%;$$

където

$U_v$  и  $I_v$  са хармонични съставки (хармоници), съответно на напрежението и тока;

- v - номер (порядък) на хармониците;
- α - параметър, който приема стойности 1 и 2.

Коефициентите на хармониците на тока и напрежението се използват за избор на филтрокомпенсатори, за оценка степента на претоварване на елементите на ЕС и за контрол на устройствата, които генерират висши хармоници.

Коефициентите на несинусоидалност са предназначени за оценка на топлинното нагряване и допълнителните загуби на активна мощност в елементите на ЕС:  $k_{ncU}$  и  $k_{ncI}$  - за силови трансформатори, кабели и въздушни електропроводи;  $k_{nc,ind}$  - за намотки на асинхронни двигатели;  $k_{nc,cap}$  - за кондензаторни батерии, включени директно без защитен реактор.

Допълнителни коефициенти, дефинирани от електро-техниката, които характеризират характера (синусоида / изкривена синусоида) на кривите на напрежението и тока:

- коефициент на формата (за синусоида  $k_f = 1.11$ )

$$k_{fU} = \frac{U}{U_{cp}}; \quad k_{fI} = \frac{I}{I_{cp}};$$

- коефициент на амплитудата (за синусоида  $k_a = \sqrt{2}$ )

$$k_{aU} = \frac{U_{max}}{U}; \quad k_{aI} = \frac{I_{max}}{I};$$

- коефициент на деформация

$$k_{DU} = \frac{U_1}{U}; \quad k_{DI} = \frac{I_1}{I},$$

където

$U$  и  $I$  са ефективните стойности на напрежението и тока на една фаза за интервала  $T=2\pi f$  ( $f$  е основната честота на захранващото напрежение);

$U_{cp}$ ,  $I_{cp}$  – средните стойности на напрежението и тока на една фаза за интервала  $T$ ;

$U_1$ ,  $I_1$  – ефективните стойности на основния хармоник на напрежението и тока;

$U_{max}$ ,  $I_{max}$  – максималните стойности на напрежението и тока в интервала  $T$ .

Сравнявайки определените стойности на коефициентите на формата и амплитудата, с помощта на анализатор за ЕМС, с характерните стойности за синусоида се определя и степента и характера на деформацията на кривите на тока и напрежението.

Степента на несиметрия на трифазна система на напрежението или тока се характеризира съответно с коефициентите на несиметрия на напрежението и тока, които се определят с изразите:

$$\varepsilon_u = \frac{U_{neg}}{U_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{neg,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_{neg}}{I_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{neg,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

където

$U_{pos}$  и  $I_{pos}$  са ефективните стойности на положителната (правата) последователност на напрежението и тока;

$U_{neg}$  и  $I_{neg}$  – ефективните стойности на отрицателната (обратната) последователност на напрежението и тока;

$U_{pos,y}$ ,  $U_{neg,y}$ ,  $I_{pos,y}$ ,  $I_{neg,y}$  – ефективните стойности на положителната и отрицателната последователност на  $v$ -тия хармоник на напрежението и тока.

Степента на неуравновесеност на трифазните системи на напрежението и тока се характеризира с коефициентите на неуравновесеност на напрежението и тока, които се определят с изразите

$$\alpha_u = \frac{U_0}{U_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=0}^{40} U_{0,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

$$\alpha_i = \frac{I_0}{I_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{0,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{pos,y}^2}} \%,$$

където

$U_0$  и  $I_0$  са ефективните стойности на нулевата последователност на напрежението и тока;

$U_{0,y}$  и  $I_{0,y}$  - ефективните стойности на хармониците на напрежението и тока с нулева последователност.

Размахът на отклонението на напрежението по фази се определя с израз

$$V(t) = \frac{U(t) - U_H}{U_H} 100, \%,$$

където

$U(t)$  е обвивната крива на ефективната стойност на напрежението;

$U_N$  – номиналното напрежение на електрическата мрежа. От зависимостта  $V(t)$  се определят средният, средноквадратичният размах и средноквадратичното отклонение на напрежението.

По аналогичен начин се определя отклонението от основната честота. Размахът на колебанията на напрежението и честотата не се разглеждат в тази работа.

За определянето на основните показатели на EMC е необходимо да се определят хармониците на ток и напрежение по фази и симетричните съставки за отделните хармоници в трифазните несиметрични системи на тока и напрежението.

Когато системите са несинусоидални и несиметрични напреженията (токовете) на отделните фази се разлагат на хармонични съставки с помощта на преобразуването на Фурие и след това за всеки отделен хармоник се определят симетричните съставки на нулева, положителна и отрицателна последователност. За определяне на хармоничните и симетричните съставки е съставен алгоритъм за анализатора.

#### АЛГОРИТЪМ НА РАБОТА

Тук ще разгледаме общата последователност на работа и алгоритъма, който най-много натоварва системата с изчислителни процедури, а именно работата в режим хармоничен анализ. Различните режими на работа на анализатора са разгледани в Сидеров *и др.* (2003).

#### Общ алгоритъм на работа на анализатора

На Фигура 1 е даден в обобщен вид алгоритъм на работа на анализатора. Той включва следните основни стъпки:

- Инициализиране на ресурсите на системата. Тук се има предвид настройка на работа на всички портове на процесора, присвояване на стойности на всички променливи необходими при изчисленията и управлението и анализ на предварително зададени настройки и данни в паметта.
- Избор на режим на работа. Избира се някой от описаните режими на работа.
- Измерване и изчисляване на всички величини заложи в съответния режим на работа.
- Анализ на избрания начин на представяне и визуализация на LCD екрана.
- Връщане отново към избор на режим на работа.

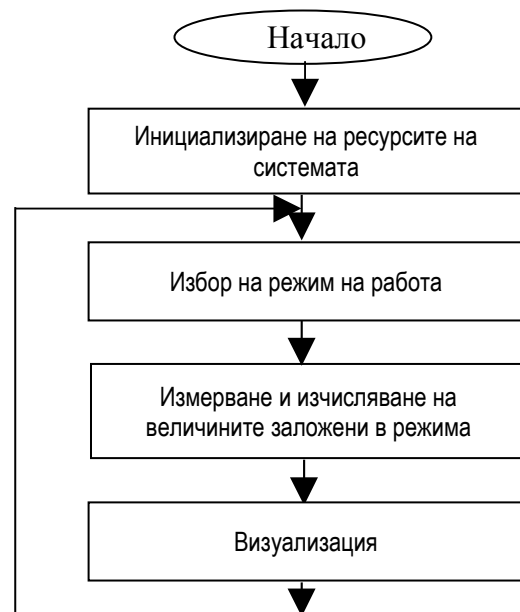
#### Алгоритъм на работа в режим хармоничен анализ

Общата последователност на работа тук е дадена на Фигура 2 и е:

- Избор и проверка на схемата на свързване.
- Задаване на основни параметри по измерването и изчисленията като: честота на дискретизация, широчина и вид на използвания "прозорец" при измерването, вид на цифровия филтър, максимален

хармоник на отчитане (горната граница зависи от преди това зададените параметри).

- Измерване на напрежението и тока чрез ADC.
- Цифрова филтрация на заснетите дискретни сигнали и запис в паметта.



Фигура 1. Блокова схема на общият алгоритъм на работа

С оглед повишаване на точността на резултатите от трансформацията на Фурие сигналът се ограничава честотно. Честотното ограничаване може да се осъществи с нискочестотни филтри. Основно се използват два типа филтри FIR (Finite Impulse Response - филтри с крайна импулсна характеристика) и IIR (Infinite Impulse Response - филтри с безкрайна импулсна характеристика). В конкретният случай е използван FIR филтърът поради простата си структура и удобните характеристики, които той притежава а именно липса на обратна връзка Иванов (1997).

Цифровият FIR филтър е линейна дискретна система с един вход и един изход, с постоянни във времето параметри, т.е системата е инвариантна към преместването във времето (реакцията на системата не зависи от момента на подаване на входния сигнал).

Нека входната последователност е  $\{u_n\}$ , а реакцията на филтъра -  $\{y_n\}$ . Всяка линейна система може еднозначно да бъде определена чрез реакцията й на последователност от единични импулси, всеки от който се дефинира по следния начин

$$\delta(k) = \{1, 0\}, k = 0, k \neq 0.$$

Входната последователност може да бъде реализирана като сума от единични импулси

$$u(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)\delta(n-k).$$

Тъй като FIR филтъра е линейна система, то неговата реакция е

$$y(n) = L\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)\delta(n-k)\right\}.$$

З а линейните и инвариантни към преместването във времето системи диференчното уравнение приема вида

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)h(n-k),$$

където  $\{h_k\}$  е импулсната характеристика на филтъра.

На практика входната последователност е ограничена. При  $N$  на брой входни дискрети за реакцията на филтъра с крайна импулсна характеристика се получава

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} u(k)h(n-k) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)u(n-k).$$

Сумата от произведението на две дискретни последователности, чиито дискрети са разместени във времето се нарича конволюция, или свиване. Диференчното уравнение може да бъде записано по следният начин

$$\{y_n\} = \{u_n * h_n\}.$$

Когато броят на входните дискрети съвпада с броя на коефициентите на филтъра, последният се реализира чрез математическата операция кръгово свиване, в противен случай – чрез апериодично свиване. Реакцията на филтъра в  $z$  – областта е

$$Y(z) = H(z)U(z),$$

където  $H(z)$  е предавателната функция на филтъра

$$H(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)z^{-k}$$

Честотна характеристика на филтъра е на практика . Този тип филтри са линейно фазови – т.е характеристиката им е линейна функция на честотата. Това свойство е голямо предимство при използването на филтъра в различни устройства. Филтърът е линейно-фазов само при коефициенти симетрични около централния коефициент т.е първия и последния са еднакви. Забавянето на един линейно-фазов филтър е  $(N-1)/F_s$ , където  $F_s$  е честотата на дискретизация (квантувъчна честота), а  $N$  е броят на дискретите. Примерно за 21 дискрети и 1kHz квантувъчна честота, закъснението ще е  $(21-1)/1 = 20$  милисекунди.

Проектирането на FIR филтъра е осъществено по метода на “прозореца”. При този метод началните импулсни характеристики се умножават с прозоречна функция. Съществуват различни прозоречни функции кръстени на откривателите им – “Прозорец” на Хемминг, Блекман, Чебишев и др. Конволюцията води до изглаждане на амплитудно-честотните характеристики. Реализирани са FIR филтри чрез използване на правоъгълен прозорец и прозорец на Хенинг (Hanning window), като вторият се изисква от стандарта БДС EN 61000-4-7. Потребителят определя типа на филтъра, който ще се използва.

При проектирането се спазва следната последователност на работа: задават се честотата на дискретизация, сръзващата честота в лентата на пропускане и сръзващата честота в лента на задържане; изчисляват се ширината на преходната лента и нормираната сръзваща честота; следва изчисляване реда на филтъра; получават се коефициентите на филтъра, след което може да се получи резултата от филтрацията по .

- Прилагане на бързото преобразуване на Фурие (FFT) и получаване на коефициентите, и съответно, и хармониците на напрежението и тока.

- 

В случаите, когато сигналите се получават експериментално, а не по аналитични изрази, съществуват два основни метода за обработката им :

- при първия метод първоначално се извършва апроксимация на функциите и след това се прилага числен метод за интегриране;
- при втория метод се извършва заместване на непрекъснатото фуриерово преобразуване с еквивалентно дискретно преобразуване на Фурие (DFT), като се използват дискретните данни; този метод използваме и ние за обработката на дискретните ни сигнали.

В конкретния, случай вместо интегриране се налага извършване на непосредствено пресмятане на DFT за всеки отчет. Така например, пресмятането на DFT с 512 ( $N=512$ ) отчета изисква  $1,5 \cdot 10^6$  математически действия. Използването на бързото преобразуване на Фурие (FFT) намалява този брой на  $N \log_2 N$  (приблизително  $2,5 \cdot 10^4$  действия за същия брой отчети) Донева *и др.* (1999). От тази гледна точка в алгоритъма се използва бързо преобразуване на Фурие.

Има различни алгоритми за реализиране на FFT. В случая се използва така наречен алгоритъм за децимация по време. Най-общо той може да се опише по следния начин: тръгва се от DFT представено във вида

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k)W^{nk}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N-1);$$

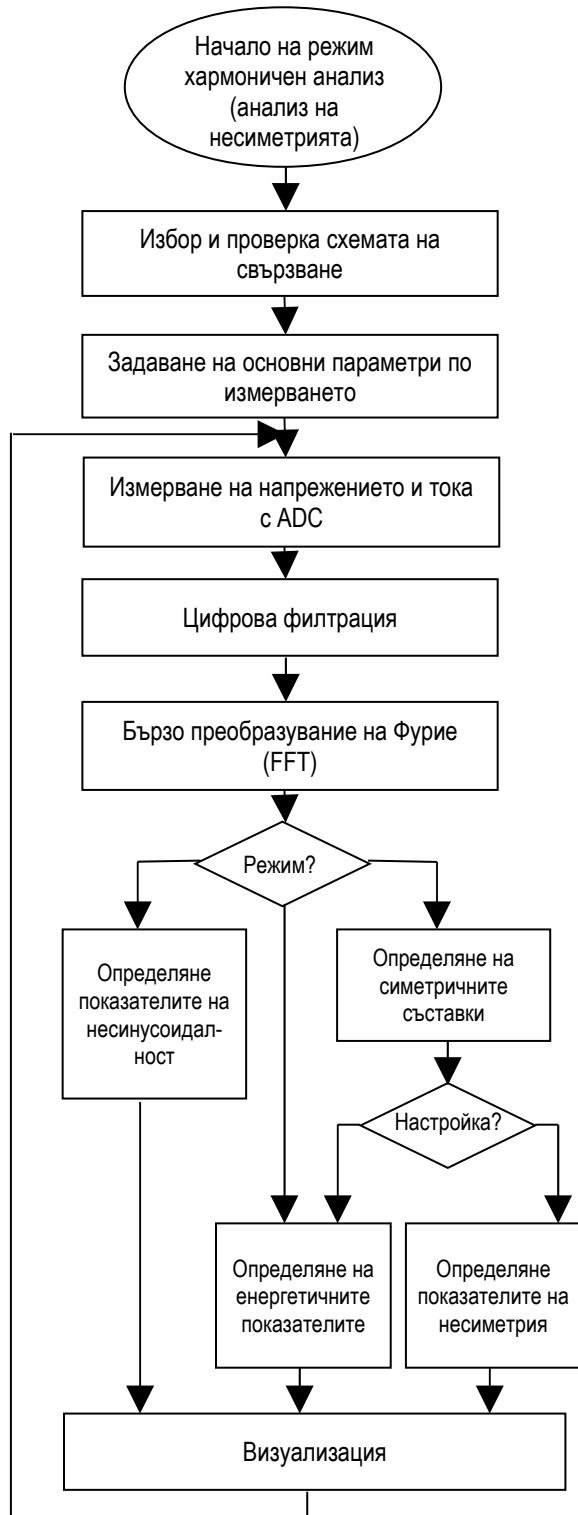
където

$F(n)$  редицата от коефициентите на DFT;

$f(k)$  – входната редица (индексът  $k$  се асоциира с времето),

а  $W = e^{-j2\pi / N}$ .

Ако предположим, че броят на отчетите  $N$  се дели на 2. В този случай е препоръчително да се разглежда DFT на две по-къси редици, едната съдържаща отчетите с четни номера  $f(2k)$  и другата съдържаща отчетите с нечетните номера  $f(2k+1)$ , където  $k=0,1,2,\dots,(N/2-1)$ . В разработения алгоритъм делението става на четири редици, което позволява по-бързото обработване на голямо количество данни. По този начин се определят хармониците на тока и напрежението едновременно и на трите фази. В такъв случай сумата може да се представи като получена от четири суми



Фигура 2. Блокова схема на работа в режим хармоничен анализ

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k)(W^n)^{2k} + \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+1)(W^n)^{(4k+1)} + \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+2)(W^n)^{(4k+2)} + \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+3)(W^n)^{(4k+3)}$$

Записан в друг вид, резултатът от процеса на деление на четири подредици е

$$F(n) = \sum_{m=0}^3 \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+m)(W^n)^{(4k+m)} = \sum_{m=0}^3 \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+m)(W^n)^{4k} (W^n)^m$$

Процесът на децимация по време продължава докато се достигне граници на изменение на  $k - 0$  и 3.

- В зависимост от избрания режим на работа следва изчисляване на показателите на несинусоидалност по формули - или показателите на несиметрия в трифазни системи по формули - , като се използват определените хармонични и симетрични съставки.
- Визуализация на избрани данни. Вида и величините се контролират от потребителя.
- Връщане отново към измерването на напрежението и тока (трета точка от алгоритъма).

В заключение може да се допълни, че освен посочените показатели свързани с електромагнитната съвместимост в електроснабдителни системи има разработени и приложени в анализатора алгоритми за изчисляване на енергетичните характеристики на електрическите мрежи и продължава работата по експериментиране, подобряване и разширяване на възможностите на системата.

## ЛИТЕРАТУРА

- Доневска С., Б.Доневски. Бързо преобразуване на Фурие. - *Технически Университет-София*, 1999.
- Иванов Р.С. Цифрова обработка на едномерни сигнали. – *Габрово, ТУ-Габрово*, 1997.
- Сидеров С., Н. Матанов, Б. Бойчев, В. Георгиев. Структура и работа на микропроцесорен анализатор на електромагнитна съвместимост. – *Юбилейна международна научна сесия 50 години МГУ "Св.Иван Рилски" 14-14 май 2003, София*.
- Шидловский А.К., Б.П.Борисов. Симетрирование однофазных и двухплечевых электротехнических установок, - *Киев*, 1977.

Препоръчана за публикуване от  
катедра "Електрификация на мините", МЕМФ

# ALGORITHM FOR EVALUATING THE BASIC CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS BY DIGITAL ANALYZER

**Sider Siderov**

**Nikolay Matanov**

**Borislav Bojchev**

**Vulchan Georgiev**

Technical University of Sofia, Sofia–1756, .8 Kl.Ohridski Blvd., Faculty of Electrical Engineering, Department of Electric Power Supply, Electrical Equipment and Electrical Transport

E-mail:  
ssiderov@tu-sofia.acad.bg

E-mail:  
matanov@bitex.com

E-mail:  
bojchev@tu-sofia.acad.bg

E-mail:  
vulchy@tu-sofia.acad.bg

## ABSTRACT

An algorithm for evaluating the basic characteristics of electromagnetic compatibility (EMC) such as harmonic and asymmetrical components, nonsinusoidal, unbalance coefficients (factors) of voltage and current in specific nodes of the electrical power systems, providing for some specific distorting big loads is presented in this paper.

This algorithm is designed for digital analyzer for control of electromagnetic compatibility of electrical power systems.

In addition, it will allow a certain research work to be carried out, concerning the methods and the precision of evaluation of electromagnetic compatibility.

An approach for determination the characteristics of electromagnetic compatibility (EMC) in electrical power system are discussed in the paper. This approach is used in digital analyzer developed by the authors. The structural scheme and functional abilities of the analyzer are discussed in retile in Сидеров и др. (2003).

## BASIC CHARACTERISTICS OF EMC

The basic EMC characteristics are subject of many standards and publication such as Шидловски и др. (1977). These characteristics are critical for electrical power quality and are related to evaluation of non-sinusoidal current and voltage, unbalance in three phase power systems, voltage variation (deviation) and fluctuation.

The basic characteristic of non-sinusoidal current and voltage are:

- Harmonic ratio of current and voltage components

$$k_{Iv} = I_{v*} = \frac{I_v}{I_1} \cdot 100, \%;$$

$$k_{Uv} = U_{v*} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100, \%;$$

- Voltage (Current) total harmonic distortion (THD)

$$k_{hcU} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{v=2}^{50} k_{Uv}^2}, \%;$$

$$k_{hcI} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} I_v^2}}{I_1} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{v=2}^{50} k_{Iv}^2}, \%;$$

- Normalized THD of inductions and capacitors:

$$k_{hc,ind} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} \left( \frac{U_v^2}{v^\alpha} \right)}}{U_1} \cdot 100, \%;$$

$$k_{hc,cap} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} (v U_v)^2}}{U_1} \cdot 100, \%;$$

where

$U_v$  and  $I_v$  are voltage and current harmonics;

$v$  - harmonic order;

$\alpha$  - a parameter taking value 1 or 2.

The current and voltage harmonics ratios are used for choosing power filters, estimating the overload power system elements and for control of the units that generate harmonics.

Harmonic distortions are intended for evaluating of heating and extra active power losses in the elements of electric power system:  $k_{hcU}$  and  $k_{hcI}$  - for power transformers, cables and airlines;  $k_{hc,ind}$  - for asynchronous motor coils;  $k_{hc,cap}$  - for directly connected capacitors, without protective inductors.

There are some more coefficients (factors), defined in the electrical engineering, which characterize the form of current and voltage:

- Form factor (sine wave -  $k_f = 1.11$ )

$$k_{fU} = \frac{U}{U_{cp}}; \quad k_{fI} = \frac{I}{I_{cp}};$$

- Crest factor (sine wave  $k_a = \sqrt{2}$ )

$$k_{aU} = \frac{U_{\max}}{U}; \quad k_{aI} = \frac{I_{\max}}{I};$$

- Fundamental factor

$$k_{DU} = \frac{U_1}{U}; \quad k_{DI} = \frac{I_1}{I},$$

where

$U$  and  $I$  are r.m.s. value of the voltage and current taken for one phase and period  $T=2\pi f$  ( $f$  is the fundamental frequency);

$U_{cp}$ ,  $I_{cp}$  – average voltage and current values for the fundamental component for one phase and period  $T$ ;

$U_1$ ,  $I_1$  – voltage and current r.m.s. values for fundamental component;

$U_{\max}$ ,  $I_{\max}$  – the maximal (peak) voltage and current values in period  $T$ .

The distortion of the current and voltage curves (forms) can be evaluated by comparing form and crest factors derived from measurements and these calculated for sine wave.

The unbalance in three-phase system is characterized by unbalance factor that can be determined to be:

$$\varepsilon_u = \frac{U_{neg}}{U_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{neg,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_{neg}}{I_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{neg,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

where

$U_{pos}$  and  $I_{pos}$  are r.m.s. values of positive sequence components of voltage and current;

$U_{neg}$  и  $I_{neg}$  – are r.m.s. values of negative sequence components of voltage and current;

$U_{pos,y}$ ,  $U_{neg,y}$ ,  $I_{pos,y}$ ,  $I_{neg,y}$  – are r.m.s. values of positive and negative sequence components of voltage and current harmonics with order  $v$ .

The degree of unbalance of a three-phase system is often characterized by unbalance factor of voltage and current which is determined as:

$$\alpha_u = \frac{U_0}{U_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=0}^{40} U_{0,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{pos,y}^2}} 100, \%;$$

$$\alpha_i = \frac{I_0}{I_{pos}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{0,y}^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} I_{pos,y}^2}} \%,$$

where

$U_0$  and  $I_0$  are r.m.s. values of direct sequence components of voltage and current;

$U_{0,v}$  и  $I_{0,v}$  – r.m.s. values of direct sequence components of voltage and current harmonics with order  $v$ .

The voltage deviation amplitude for each phase can be defined by the expression

$$V(t) = \frac{U(t) - U_H}{U_H} 100, \%,$$

where

$U(t)$  is wrapping curve of the voltage r.m.s. values;

$U_H$  – the nominal voltage of the power system.

The average and r.m.s. amplitude as well as average and r.m.s. voltage deviation can be determined from  $V(t)$ .

In analogical manner the fundamental frequency deviation can be determined. The voltage and frequency fluctuation are not subject of this paper.

The voltage and current harmonic calculation are necessary to determine the basic EMC characteristics. Direct positive and negative component are estimated in three-phase unbalance systems.

When current and voltage are non-sinusoidal and unbalance, first the Fourier transformation has to be done and after that the direct, positive and negative sequence component are calculated for each harmonic. The algorithm discussed in this paper considers the way of determination of the above quantities.

## OPERATION ALGORITHM

This paragraph considers the main algorithm and it's heaviest part – harmonic analysis that will be discussed in details. All possible operation modes are described in Сидеров и др. (2003).

### General operation algorithm

Generalized flowchart of the operation algorithm is given in Фигура 1. The following basic steps are shown:

- Initializing the system resources assigning initial values to all variables, configuration I/O interface and data memory check.



- Operation mode choosing. The desired mode has to be selected in accordance with the client task.
- Measurement. At this point all quantities related to chosen mode are measured and acquired data are put into computation routines.
- Visualization (Show) of the results in the LCD.
- Returning to operation mode choice.

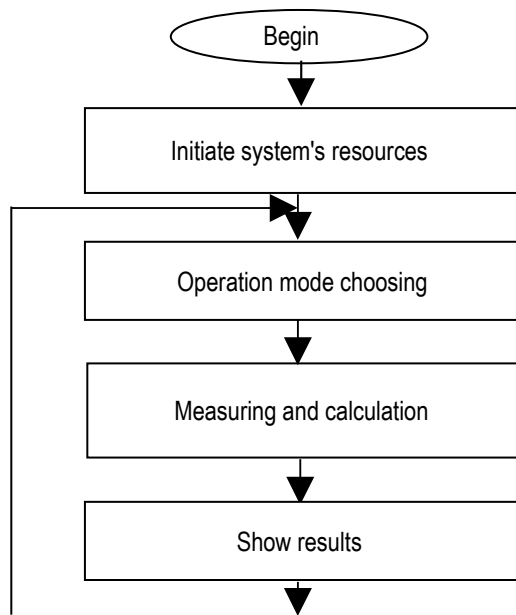


Figure 3. Flowchart of general operation algorithm

#### Algorithm in harmonic analysis mode

A flowchart describing working sequence is given in Фигура 2. The main steps are:

- Choice of the external connection scheme. After each change a checking subroutines is started to reassume absence of mistakes.
- Setup of the basic measurement and calculating parameters. The user can select some measurement parameters as: sample rate, the kind of window function, the kind of anti-aliasing filter, the maximum harmonic order (the upper bound of the harmonic order depends on the previously setup parameters)
- Performing the actual measurement with ADC.
- Filtering the acquired data and saving in the memory.

As it is well known the input signals has to be limited in the frequency domain in order to receive correct results from Fast Fourier Transform (FFT). A digital filter is used to prevent the aliasing of out-of-band noise and interference. A Finite Impulse Response (FIR) filter is chosen because of its simplicity and suitable characteristics.

The digital FIR filter is linear discrete system with single input and single output. It has constant (according to time) parameters. In that way the system reactions is independent from the input signal initial time. Any linear system can be unambiguously determined by its reaction to the series of normalized pulses, each of which can be defined by the following expression Иванов (1997):

$$\delta(k) = \{1, 0\}, k = 0, k \neq 0.$$

If we mark the filter input with  $\{u_n\}$  and its reaction (i.e. output) with  $\{y_n\}$ , the input can be presented as a sum of normalized pulses

$$u(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)\delta(n-k)$$

And the filter output is expressed by

$$y(n) = L\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)\delta(n-k)\right].$$

For the linear, time invariant systems, equation can be written as

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k)h(n-k),$$

where  $\{h_k\}$  is impulse response of the filter. In practice the input sequence is constrained, so if the number of input points is  $N$ , the FIR filter output will be

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} u(k)h(n-k) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)u(n-k).$$

This sum is called convolution and can be written in the next way

$$\{y_n\} = \{u_n * h_n\}.$$

If the number of discrete input values is equal to the number of filter coefficient, it is realized by the mathematical operation ring shrinkage (circular shrinkage) but if not aperiodic shrinkage is used.

The filter response in the z-domain is

$$Y(z) = H(z)U(z),$$

Where  $H(z)$  is the filter transfer function

$$H(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)z^{-k}$$

The phase response of this kind of filters is a linear function of the frequency, which is a big advantage of such kind of

applications. The linearity is achieved only for the filter coefficients are symmetrical around the central coefficient (i.e. the first and the last coefficients has to be equal). The linear filter delay is  $(N - 1)/F_s$ , where  $F_s$  is the sampling frequency, and  $N$  is the number of points. For instance for 21 point and 1 kHz sampling rate the delay will be 20 ms. In practice the frequency response is given by .

The "windowing" approach is accepted in filter design. The initial impulse response is multiplied by "window" function. The convolution realized in that way leads to smoothing in the frequency response. The user can chose between rectangular window and Hanning window. The last one is required by standard EN 61000-4-7.

In filter design the following sequence is accepted: first the sampling rate is set; the pass band and the hold band are set, after that the transition band with and normalized cutting frequency are calculated. Finally filter order and filter coefficient are defined. The results after filtration can be obtained by using equation .

- Performing Fast Fourier Transformation (FFT) and determine current and voltage harmonic ratio.

When the signals are captured experimentally but are not given as analytical expressions, there are two common methods for their processing:

- In the first one a function approximation is done, followed by numerical integration.;
- In the second method continuous Fourier Transformation is replaced by Discrete Fourier Transformation (DFT). This approach suits better to our tasks. The FFT is always preferred than directly applying DFT because of reducing mathematical operations. For example DFT with 512 samples requires  $1,5 \cdot 10^6$  mathematical operations, while by FFT this number can be reduced to about  $2,5 \cdot 10^4$  mathematical operations for same number of samples. In general FFT requires  $N \cdot \log_2 N$  complex multiplications, where  $N$  is the number of samples Донева *и др.* (1999).

The abbreviation FFT represents not single method but set of algorithms that speed up the process. One widely used algorithm is called "time decimation". It can be generally described with the following equations:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k)W^{nk}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N - 1);$$

where

$F(n)$  is coefficients row of DFT;

$f(k)$  – input data sequence (the index  $k$  associated with the time),  $W = e^{-j2\pi / N}$ .

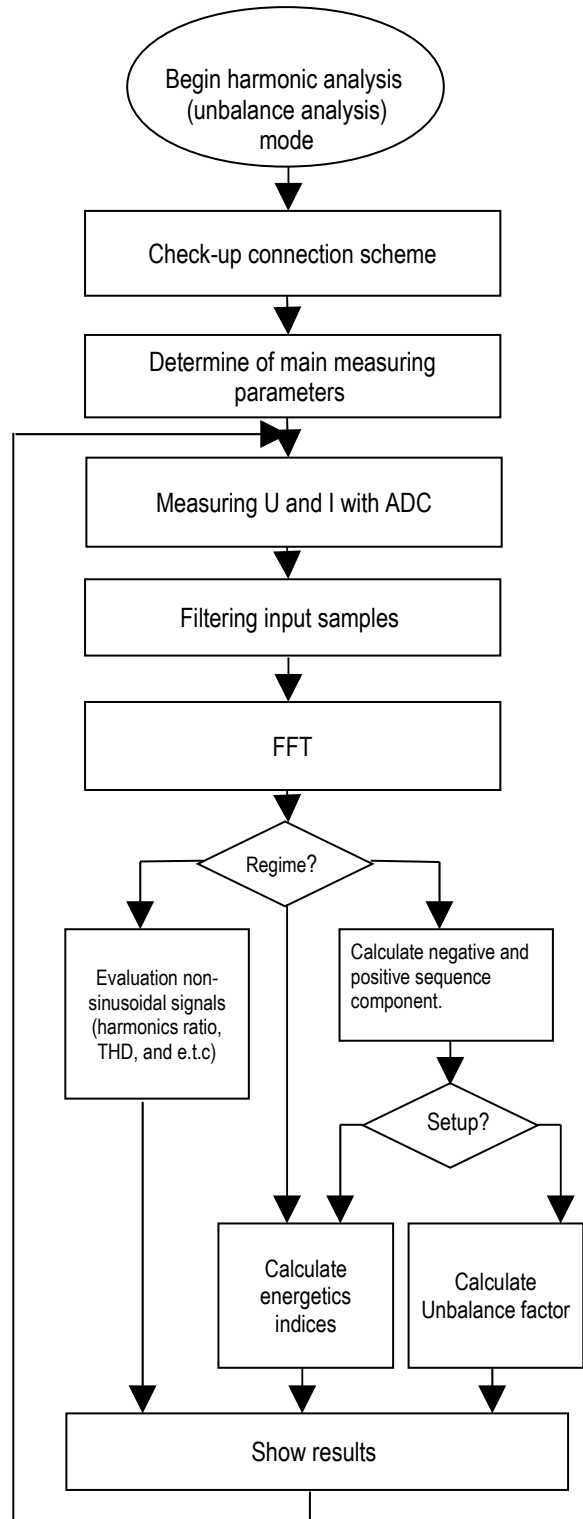


Figure 4. Flowchart for harmonic analysis mode

If the number of samples  $N$  can be divided by 2, the initial DFT can be decomposed in two shorter subsequences – the first one containing all samples with even indexes  $f(2k)$ , and the second one comprised by all samples with odd indexes  $f(2k+1)$ , where  $k=0, 1, 2, \dots, (N/2-1)$ . Each of these two new rows of data is decomposed in to parts in its turn. In that way the current and voltage harmonics are evaluated for all three phases at the same time. In this case the sum can be represented by four subsumes given by .

$$\begin{aligned}
F(n) &= \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k)(W^n)^{2k} + \\
&+ \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+1)(W^n)^{(4k+1)} + \\
&+ \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+2)(W^n)^{(4k+2)} + \\
&+ \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+3)(W^n)^{(4k+3)}.
\end{aligned}$$

This formula can be written in other way

$$\begin{aligned}
F(n) &= \sum_{m=0}^3 \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+m)(W^n)^{(4k+m)} = \\
&= \sum_{m=0}^3 \sum_{k=0}^{N/4-1} f(4k+m)(W^n)^{4k} (W^n)^m
\end{aligned}$$

The time decimation process continues until initial and final values for  $k$  become equal to 0 and 3.

- In dependence on the current mode of operation either non-sinusoidality characteristics are calculated by expressions - or unbalance parameters are calculated in accordance to the equations - .
- The analyze is completed by visualization of the results. In stand-alone regime of operation the results are shown in graphics LCD module. If the analyzer is

connected to PC specially developed software capture the data and gives much more possibilities for data processing and visualization.

- The algorithm loops with measurement of the next current and voltage periods.

The analyzer can evaluate a wide variety of EMC characteristics. In addition active and reactive power for a user-supplied interval can be measured. In such way observation of the load variation could be performed.

During the last few years the requirements concerning EMC became stronger and stronger. Such requirements are included in the new standards. This means that the question for fast and cheap measuring devices is its importance.

## REFERENCES

- Доневска С., Б.Доневски. Бързо преобразуване на Фурие. - *Технически Университет-София, 1999.*
- Иванов Р.С. Цифрова обработка на едномерни сигнали. – *Габрово, ТУ-Габрово, 1997.*
- Сидеров С., Н. Матанов, Б. Бойчев, В. Георгиев. Структура и работа на микропроцесорен анализатор на електромагнитна съвместимост. – *Юбилейна международна научна сесия 50 години МГУ "Св.Иван Рилски" 14-14 май 2003, София.*
- Шидловский А.К., Б.П.Борисов. Симетрирование однофазных и двухплечевых электротехнических установок, - *Киев, 1977.*