



## **ХАРМОНИЧЕН АНАЛИЗ НА МРЕЖОВИЯ ТОК ПРИ АСИНХРОННИ ЗАДВИЖВАНИЯ С ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ**

**Васил Димитров**

[vdimitroff@abv.bg](mailto:vdimitroff@abv.bg)

**ВТУ „Тодор Каблешков“ – София,  
ул. Гео Милев“ 158, София 1574  
БЪЛГАРИЯ**

**Ключови думи:** хармоничен анализ, коефициент THD, асинхронни задвижвания

**Резюме:** Хармоничните изкривявания на формата на напрежението и тока в мрежата могат да доведат до повреди на защитната апаратура или непрекъсваеми токозахранващи устройства, до изключвания на главни прекъсвачи, до пробиви в изолацията на електрически машини и трансформатори. Наличието на висши хармоници води до увеличаване на тока в мрежата и до повишаване на температурата на неутралните проводници и разпределителните трансформатори, като може да причини аварии в мрежата. Ето защо е важно да се оцени общият ефект на тези хармоници. Сумата на всички хармонични компоненти във формата на напрежението или тока, изразена в проценти спрямо основния хармоник, показва общото хармонично изкривяване (Total Harmonic Distortion – THD). Разработен е лабораторен симулатор, който създава възможност за изпитания на асинхронни задвижвания с честотно управление. В настоящата статия са направени експерименти с цел определянето на хармоничния състав на тока в мрежата при различни скорости и натоварване на задвижването. Използва се преносим мултифункционален уред NET VISION 2010, чрез който може да се извърши прецизно измерване на параметрите на електрическата енергия. По този начин е направено сравнение между теоретичните зависимости и получените резултати.

### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Един от показателите на качеството на електрическата енергия според стандарта е напрежението да има синусоидална форма. Несинусоидалността се предизвиква от нелинейната волт-амперна характеристика на някои консуматори (полупроводникови преобразователи и изправители, заваръчни агрегати, електродъгови пещи, газоразрядни източници на светлина и др.), поради което протичащите токове са несинусоидални, независимо че захранващото напрежение е синусоидално [1]. Хармоничните токове са паразитни – консумирана, платена и загубена за предприятието електрическа енергия. Хармониците нямат епизодичен характер – те присъстват постоянно в захранващата мрежа, докато предизвикващото ги оборудване е свързано към мрежата. В немалко приложения присъствието на хармоници не е опасно, тъй като нивото им е под допустимото и не оказва влияние върху работата на консуматорите. Напълно възможно е, обаче, в критичен за производствената дейност момент (едновременно включване на множество товари или при преходни процеси), да се получи срив в електро-

захранващата система. Наред с това, съвременните електронни устройства като комуникационни или компютърни системи стават все по-чувствителни към качеството на електрозахранването. Често именно присъствието на хармоници е причина за "случайно" изключване на автоматични прекъсвачи, блокиране или рестартиране на компютърни системи, контролери или комуникационно оборудване, повреди на двигатели и трансформатори и др. Ето защо проблемите, произтичащи от хармоничните изкривявания на тока и напрежението в мрежата, са много сериозни и е задължително да им се обръща внимание, да се търсят възможни решения за противодействие.

Типичен пример за източник на хармонични изкривявания в областта на индустрията са честотните преобразуватели за регулиране на скоростта на асинхронни двигатели. При това отрицателното влияние на хармониците би могло да доведе до повреда не само на двигателя и управляващото устройство, но и на други консуматори, свързани на същите захранващи шини. Целта на настоящата статия е да се предложи метод за определяне зависимостта на хармоничния състав на тока от режима на работа на задвижването при използване на честотни преобразуватели за регулиране на скоростта и момента на асинхронни двигатели. Разработен е лабораторен симулатор, като за измерването на коефициента на изкривяване на формата на тока и амплитудата на висшите хармоници се използва подходяща апаратура.

## ТЕОРЕТИЧНИ СВЕДЕНИЯ

При токоизправителите, които са първото звено за преобразуване на енергията в честотните преобразуватели, обикновено първичният ток  $I_1$  е несинусоидален и основният му хармоник  $I_{1(1)}$  изостава по отношение на мрежовото напрежение на ъгъл  $\varphi_{(1)}$ . За да се характеризира качеството на използваната електрическа енергия, се дефинира коефициентът на мощност, който в най-общ вид е отношението на активната мощност на първия хармоник към пълната мощност, която се черпи от мрежата:

$$(1) \quad K_M = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{S_{(1)}}{S} \cdot \frac{P_{(1)}}{S_{(1)}} = \nu \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

където  $\nu$  е кофициент на изкривяване и се определя като отношение на пълната мощност на първия хармоник и пълната мощност, която се черпи от мрежата. Той характеризира изкривяването на първичния ток на токоизправителя:

$$(2) \quad \nu = \frac{S_{(1)}}{S} = \frac{I_{1(1)}}{I_1} = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + \sum I_{1(n)}^2}},$$

където  $n$  е номерът на съответния хармоник.

Присъствието на хармонични изкривявания в мрежата налага измерването на комплекс параметри на изкривените сигнали. Представянето на променливите напрежения и токове чрез ефективните им стойности е недостатъчно за определяне и оценка на изкривяванията на сигнала [1, 2]. Необходимо е отчитане на максимална стойност, на коефициент на изкривявания и др. Измерването на хармоничните токове определя степента на разпространение на изкривяванията в различни клонове на мрежата и позволява бързо и сигурно откриване на източника на висши хармоници.

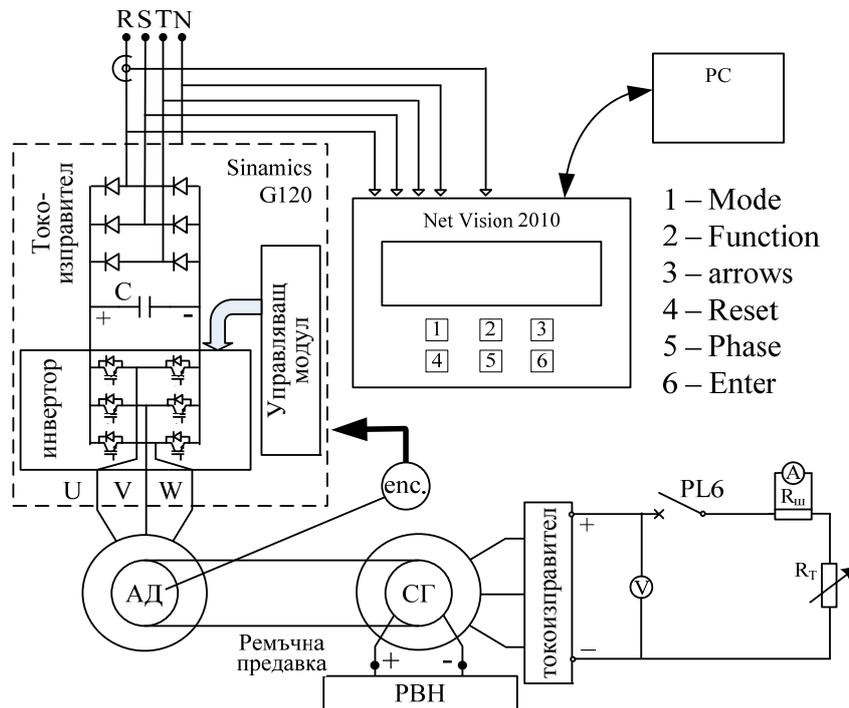
Един от методите за оценка на несинусоидалността на тока или напрежението е измерването на коефициента THD, определен като отношение между амплитудната стойност на величината ( $U_m$  или  $I_m$ ) и ефективната ѝ стойност, умножена по  $\sqrt{2}$ :

$$(3) \quad THD_U = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot U}; THD_I = \frac{I_m}{\sqrt{2} \cdot I}$$

При синусоидална форма коефициентът  $THD = 1$  (липса на хармоници). С нарастване амплитудите на висшите хармоници  $THD$  се увеличава.

## ЛАБОРАТОРЕН СИМУЛАТОР

За провеждане на изпитанията се използва лабораторен симулатор за изследване на асинхронни електрозадвижвания с честотно управление [3, 4, 5]. За определяне на коефициента на изкривяване на формата на тока, на  $\cos\phi$  и за хармоничен анализ се използва преносим мултифункционален уред NET VISION 2010 (фиг.1). Той намира приложение при изследване параметрите на трифазни вериги, тъй като е съчетание на мултимер, двулъчев осцилоскоп, спектрален анализатор и уред за определяне на векторна диаграма [6]. В режим на хармоничен анализ показва амплитудите на нечетните хармоници до 15<sup>-ти</sup> включително в проценти спрямо първия хармоник, както и дефазирването им.



Фиг. 1 Схема на лабораторен симулатор при изследване на хармоничния състав на тока в мрежата

## РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗПИТАНИЯТА

Параметрите на тока в мрежата се следят чрез уреда Net Vision: ефективни стойности в трите фази  $I_1, I_2, I_3$ ; аплитудни стойности в трите фази  $I_{1m}, I_{2m}, I_{3m}$ ; коефициентите на изкривяване на токовете на трите фази  $THD_1, THD_2$  и  $THD_3$ ; амплитудите  $I_{(3)} \dots I_{(15)}$  на нечетните хармоници до 15<sup>-ти</sup> в % спрямо първия хармоник,  $\cos\phi$  за всяка фаза. Измерванията са проведени за две различни скорости на двигателя, като се променя натоварването и се измерват токът  $I_T$  и напрежението  $U_T$ . Предварително е избран режим на векторно управление, който гарантира стабилна скорост независимо от товара. Резултатите, получени при  $n = 900 \text{ rpm}$  са показани в табл. 1. Същевременно се отчитат и параметрите на напрежението: ефективни стойности в трите фази  $U_1, U_2, U_3$ ; амплитуди  $U_{(3)} \dots U_{(9)}$  на нечетните хармоници до 9<sup>-ти</sup> в % спрямо първия хармоник (табл. 2). Стойностите на амплитудите  $U_{(11)} \dots U_{(15)}$  са незначителни и не са включени в таблицата. Подобни таблици са попълнени и при  $n = 1350 \text{ rpm}$ . Въз основа на получените резултати са показани графиките на хармоничния състав на тока при двете скорости (фиг. 2 и 3), както и измененията на  $THD$  и  $\cos\phi$  (фиг. 4).

**Таблица 1**  
**Параметри на тока в мрежата**

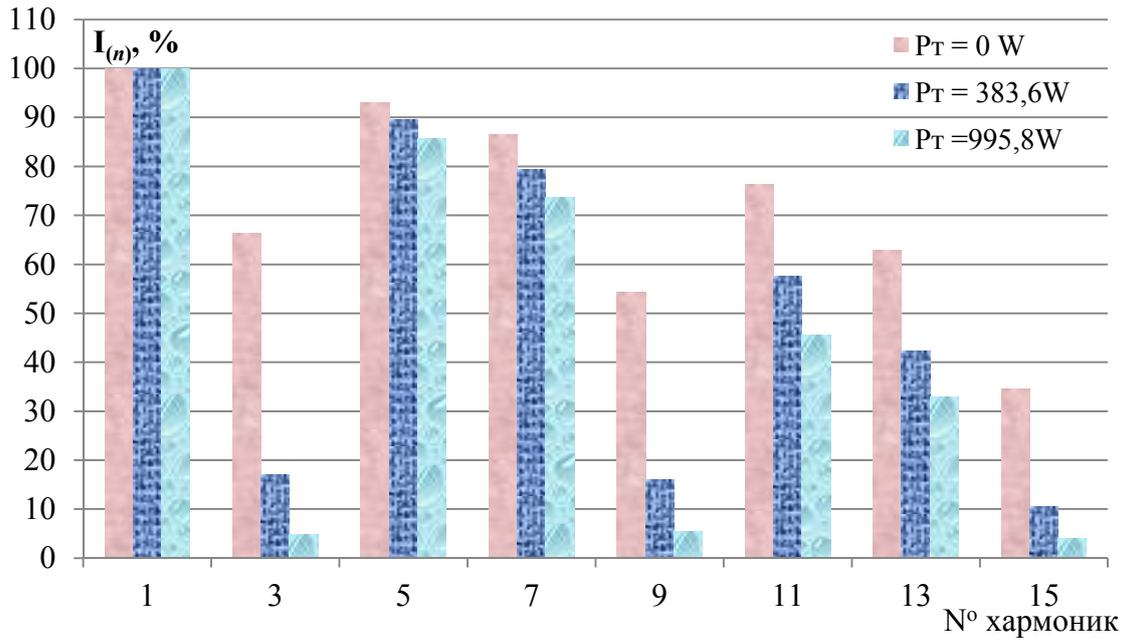
n 900 rpm	$I_T = 0 \text{ A}$ $U_T = 28 \text{ V}$ $P_T = 0 \text{ W}$				$I_T = 13,7 \text{ A}$ $U_T = 28 \text{ V}$ $P_T = 383,6 \text{ W}$				$I_T = 38,3 \text{ A}$ $U_T = 26 \text{ V}$ $P_T = 995,8 \text{ W}$			
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_{cp}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_{cp}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_{cp}$
$I, \text{ A}$	0.64	0.45	0.33	0.47	1.65	1.42	1.42	1.50	3.76	3.5	3.65	3.64
$I_m, \text{ A}$	4.68	4.15	2.84	3.89	7.69	7.14	6.6	7.14	17	15.6	16.7	16.43
$I_{(3)}$	35.60%	83%	81%	66.53%	11.60%	18%	22.80%	17.47%	2.20%	2.50%	9.90%	4.87%
$I_{(5)}$	97%	90%	92%	93.00%	91%	83%	95.50%	89.83%	86.60%	83.70%	88.50%	86.27%
$I_{(7)}$	86%	90%	84%	86.67%	78%	86%	75.50%	79.83%	73.90%	77.20%	71.40%	74.17%
$I_{(9)}$	24%	68%	71%	54.33%	4.50%	16.80%	28.90%	16.73%	2.30%	6.80%	6.90%	5.33%
$I_{(11)}$	80%	69%	80%	76.33%	57.60%	48.50%	68%	58.03%	46.80%	42.30%	49%	46.03%
$I_{(13)}$	60%	68%	61%	63.00%	41.90%	49.50%	37.20%	42.87%	33.30%	36.10%	30.80%	33.40%
$I_{(15)}$	13%	43%	48%	34.67%	3%	15.90%	14.20%	11.03%	0.60%	7.20%	4.50%	4.10%
$THD$	2.55	3.11	3.44	3.03	2	2.32	2.29	2.20	2.14	2.2	2.2	2.18
$\cos\varphi$	0.47	0.37	0.38	0.41	0.57	0.55	0.53	0.55	0.6	0.61	0.59	0.6

**Таблица 2**  
**Параметри на напрежението**

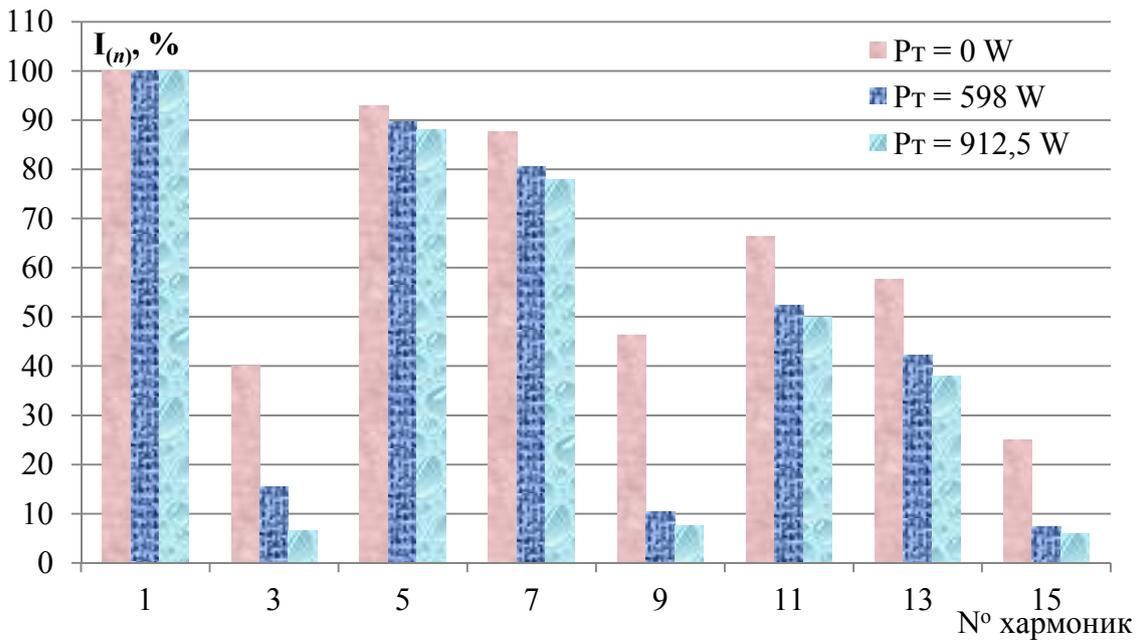
n 900 rpm	$I_T = 0 \text{ A}$ $U_T = 28 \text{ V}$ $P_T = 0 \text{ W}$				$I_T = 13,7 \text{ A}$ $U_T = 28 \text{ V}$ $P_T = 383,6 \text{ W}$				$I_T = 38,3 \text{ A}$ $U_T = 26 \text{ V}$ $P_T = 995,8 \text{ W}$			
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{cp}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{cp}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{cp}$
$U, \text{ V}$	225	222	230	225.67	226	222	230	226	228	224	228	226.67
$U_{(3)}$	1%	1%	0,7%	0.90%	0,6%	0,9%	0,7%	0.73%	0,9%	0,8%	0,7%	0.80%
$U_{(5)}$	2.4%	1,9%	1,7%	2.0%	2,1%	0,8%	0,4%	1.10%	1,6%	1,9%	1,5%	1.67%
$U_{(7)}$	0,7%	0,6%	0,3%	0.53%	0,5%	0,4%	0,2%	0.37%	0,6%	0,4%	0,2%	0.40%
$U_{(9)}$	0,5%	0,4%	0,4%	0.43%	0,43%	0,3%	0,3%	0.33%	0,4%	0,3%	0,3%	0.33%

**ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

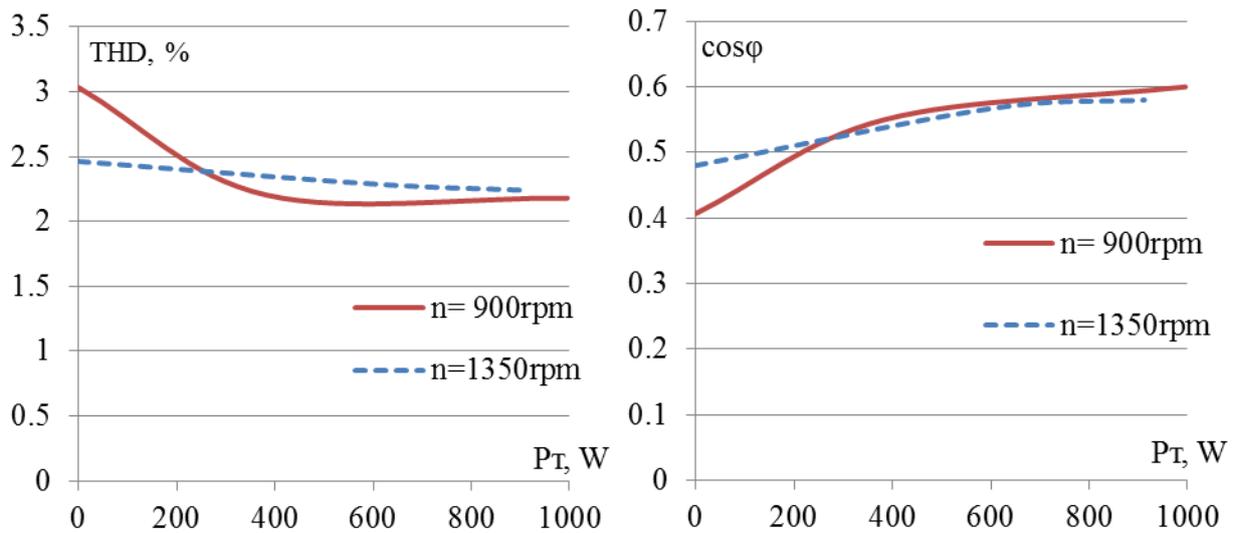
От направените изследвания ясно се вижда, че нивото на хармоници във формата на напрежението е в допустимите норми: всички амплитуди са под 3% спрямо основния хармоник [2] (IEEE Std 519 “Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”). По отношение на тока, хармониците, кратни на 3, имат много по-ниски стойности в сравнение с останалите, особено при увеличаването на натоварването (точно тези хармоници оказват по-вредно влияние в мрежата). При по-голям товар коефициентът на изкривяване на формата и амплитудите на всички хармоници намаляват, което е особено изразено при ниските скорости. Изменението на THD при по-висока скорост не е така осезаемо, тъй като задвижването работи при честота, близка до номиналната. С увеличаването на натоварването  $\cos\varphi$  резонно се подобрява. Следователно, характеристиките, получени по използвания метод, съвпадат с теоретично изведените зависимости.



Фиг. 2 - Зависимост на хармоничния състав на тока от натоварването при  $n = 900 \text{rpm}$



Фиг. 3 - Зависимост на хармоничния състав на тока от натоварването при  $n = 1350 \text{rpm}$



Фиг. 4 - Зависимости на коефициента на изкривяване на формата на тока и  $\cos\phi$  от натоварването

#### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Shmilovitz D., On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No 1, 2005, pp.526-528
- [2] Total Harmonic Distortion and Effects in Electrical Power Systems, Associated Power Technologies, 2011
- [3] Dimitrov V., Examination of Frequency Controlled Asynchronous Drives at Variable Load Torque – Laboratory Simulator, XLVII Int. Conf. ICEST 2012, 28-30 June, 2012, V. Tarnovo, Bulgaria, Proceedings of Papers, Vol. 2, ISBN: 978-619-167-003-1, pp. 567-570
- [4] Димитров В., Изследване на преходни режими при асинхронни задвижвания с честотно управление – лабораторен симулатор, IV-та научна конференция „ЕФ 2012“, Созопол, 28.09 – 01.10.2012, Сборник научни трудове, том 2, стр. 265 - 271
- [5] Dimitrov V., Dimkina E., Dimitrova E., Research of Frequency Controlled Asynchronous Drives Applicability in Electric Vehicles-Laboratory Simulator, 5<sup>th</sup> Int. Conf. EpsMsO, Athens, Greece, 3-6 July, 2013, Proceedings, Vol. II, SET: 978-618-80527-0-3, ISBN: 978-618-80527-2-7, pp. 489 - 495
- [6] Net Vision 2010 Three-phase network analyzer, <http://bg.emsyst.com/netvision.php>

# HARMONIC ANALYSIS OF MAINS CURRENT AT ASYNCHRONOUS DRIVES WITH FREQUENCY CONTROL

Vasil Dimitrov  
[vdimitroff@abv.bg](mailto:vdimitroff@abv.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport – Sofia  
158 Geo Milev Str., Sofia 1574,  
BULGARIA*

**Key words:** *Harmonic analysis, Total Harmonic Distortion, asynchronous drives*

**Abstract:** *The harmonics can cause problems ranging from telephone transmission interference, relay or UPS damages to degradation of conductors and insulating material in motors and transformers. Unwanted distortion can increase the current in power systems which results in higher temperatures in neutral conductors and distribution transformers and could cause damage to power systems. Therefore it is important to gauge the total effect of these harmonics. The summation of all harmonic components of the voltage or current waveform compared against the fundamental component of the voltage or current wave is known as total harmonic distortion (THD). The end result is a percentage comparing the harmonic components to the fundamental component of a signal. The higher the percentage, the more distortion that is present on the mains signal. A laboratory stand was developed and gives many possibilities of examinations of frequency controlled asynchronous drives. In this article, some experimental tests on the harmonic presence at various speed and load are examined. NET VISION 2010 portable device is used for a precise measurement of the electric values of the mains voltage and current. A comparison with theoretically deduced relationships and obtained results is made.*