

# ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Светлана Цветкова, Николай Стоманярски, Ангел Петлешков

*Резюме:* В доклада са дадени резултати от изследване на влиянието на честотен преобразувател върху показателите за качество на електрическата енергия, който се използва при най-разпространените задвижвания с трифазни асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор. Изследвана е и работата на двигателя със софтстартер. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи.

*Ключови думи:* качество на електрическата енергия, честотен преобразувател, софтстартер.

## INFLUENCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT ON ELECTRICAL ENERGY QUALITY

Svetlana Tzvetkova, Nikolai Stomaniarski, Angel Petleshkov

*Abstract:* The frequency converters are used today in the most widespread drives with three phase squirrel-cage induction motors. Results from study of the influence of frequency converter on electrical energy quality indexes are given. The work of the motor with soft starter is studied too. The obtained results for electrical energy quality indexes are analyzed and compared with normative documents.

*Keywords:* electrical energy quality, frequency converter, soft starter.

### 1. Въведение

С оглед на ефективното използване на електрическата енергия е желателно мрежовото променливо напрежение да се променя с постоянна честота, да има синусоидална форма и постоянна големина. Един от основните фактори влияещи върху изменението на тези характеристики са самите консуматори. В този смисъл консуматорите на електрическа енергия са важен партньор заедно с електроснабдителната компания, в усилията да се поддържа качеството на електрическата енергия. За оценка на влиянието на дадени консуматори върху качеството на електрическата енергия е необходимо провеждане на експериментални изследвания [1].

Най-разпространеният начин за управление на скоростта на електрическите двигатели, а от там и на производителността на задвижваните

производствени механизми е с използване на съвременни честотни преобразуватели, при които напрежението е функция на честотата. В най-простия случай съотношението между напрежението и честотата се поддържа постоянно. По този начин се осигурява необходимият момент на вала на двигателя без да се стига до прегряване. Изходната честота не зависи от честотата на мрежата и може да бъде както по-голяма, така и по-малка от нея. Скоростта на двигателя може да се регулира както под синхронната, така и над синхронната. Честотата и напрежението не са ограничени и асинхронния двигател може да се пуска и ускорява от неподвижно състояние.

Честотният преобразувател се състои от неуправляем токоизправител, постояннотоково звено и инвертор, т.е. има налични полупроводникови елементи с нелинейна V-A характеристика, които могат в някаква степен да влошат качеството на електрическата енергия на останалите консуматори.

В доклада са дадени резултати от изследване на влиянието на честотен преобразувател върху показателите за качество на електрическата енергия, който се използва днес масово при най-разпространените задвижвания с трифазни асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор. Изследвана е и работата на двигателя със софтстартер. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи [2, 3].

## 2. Характеристика на обекта на изследване

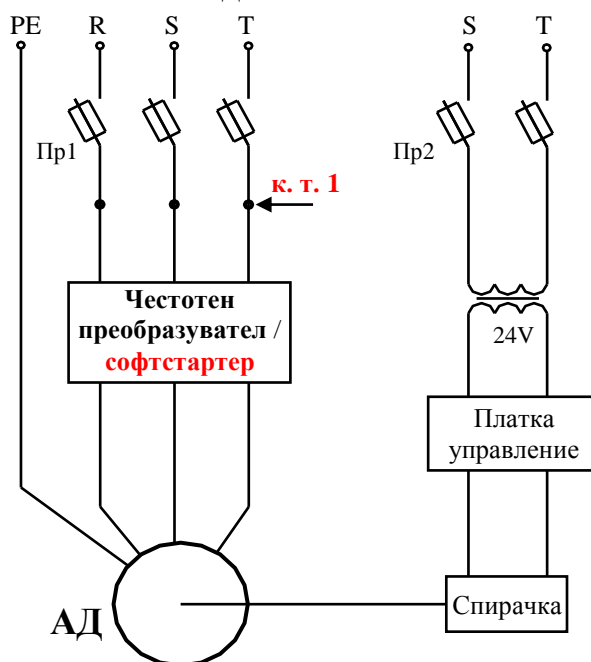
Изследва се работата на асинхронен двигател с честотен преобразувател и със софтстартер. На фиг. 1 е показана схема на опитната постановка.

Номиналните параметри на трифазния асинхронен двигател с накъсосъединен ротор са: тип АО90s-4;  $P_H=1,1\text{kW}$ ;  $f=50\text{Hz}$ ; свързване  $\Delta/Y$ ;  $U_H=220/380\text{V}$ ;  $I_H=4,9/2,8\text{A}$ ;  $n_H=1410\text{min}^{-1}$ ;  $\cos\varphi=0,80$ ; S1; IP44; 18 kg.

Използваният честотен преобразувател е производство на Danfoss тип VLT HVAC Drive с номинални данни дадени в Таблица 1.

Номиналните данни на софтстартера производство на Danfoss са:  $U_H=400-415\text{V}$  50/60Hz;  $I_H=\max 3,5\text{A}$  AC;  $U_V=24-415\text{V}$  AC/DC.

За натоварване на двигателя се използва електромагнитна спирачка тип P35 със следните данни:



Фиг. 1. Схема на опитната постановка

Таблица 1

	$U_H, \text{V}$	$f, \text{Hz}$	$I_H, \text{A}$
Входни параметри	3x380AC - 480V	50/60	2,7/2,6
Изходни параметри	3x0AC ÷ $U_H$	0÷590	3/2,7
$P_H=1,1\text{kW}(400\text{V})/1,5\text{HP}(460\text{V}), \text{IP20}$			

$U_{\text{захр}}=110-230\text{V AC}$ ,  $f=50/60\text{Hz}$ ,  $U_{\text{изх}}=24\text{V AC/DC} \pm 10\%$ , входен сигнал 0-10V от потенциометър 10k $\Omega$ , изходен сигнал 0-2A, консумирана мощност 30W, чувствителност 10mV.

### 3. Изследване на качеството на електрическата енергия

Целта е да се оцени влиянието на честотен преобразувател за управление на асинхронен двигател с накъсосоединен ротор върху показателите за качество на електрическата енергия. Проведени са две изследвания: с честотен преобразувател и със софтвер. И двете измервания се провеждат при 80% натоварване на двигателя с помощта на електромагнитната спирачка. За целта спирачката се захранва с напрежение 4V.

Измерванията са проведени с трифазен анализатор на качеството на електрическата енергия QUALISTAR C.A 8332. Захранващата мрежа е трифазна, трипроводна. Периодът на измерване е 1 минута, с интервал от време за осредняване на измерванията от 1s или за всеки от изследваните параметри са получени 60 стойности. Получената информация от измерванията е обработена с DataView Professional и Qualistar Viewer V2.

#### 3.1. Изследване на показателите за качество на електрическата енергия при работа на двигателя с честотен преобразувател

За контролна точка за провеждане на измерванията е избрана к. т. 1, намираща се на входа на честотния преобразувател (фиг. 1), като по този начин може да се оцени влиянието му върху показателите за качество на електрическата енергия и върху работата на другите консуматори.

- Честота на захранващото напрежение

Максималната стойност на честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е 50.01 Hz, минималната стойност е 49.99 Hz, а средната стойност е 50.00 Hz. В 100% от случаите честотата на захранващото напрежение е в допустимите норми от 49,5÷50,5Hz за 99,5% от годишен период или 47÷52Hz целогодишно, регламентирани в стандарта БДС EN 50160, чрез който регулаторните органи следят за качеството на електрическата енергия.

- Захранващо напрежение

В Таблица 2 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фазните и на линейните напрежения за периода на измерване.

Максималното отклонение на фазното напрежение е:  $L_1=2,22\%$ ,  $L_2=2\%$ ,  $L_3=2,34\%$ , а на линейното напрежение –  $L_{12}=1,38\%$ ,  $L_{23}=1,95\%$ ,  $L_{13}=2,0\%$ .

Таблица 2. Стойности на фазните и на линейните напрежения

Величина	Фаза	Стойност		
		мини-мална	макси-мална	средна
фазно напрежение, V	L <sub>1</sub>	234,8	235,1	234,9
	L <sub>2</sub>	234,1	234,6	234,3
	L <sub>3</sub>	235,0	235,4	235,1
линейно напрежение, V	L <sub>12</sub>	404,7	405,5	405,1
	L <sub>23</sub>	406,9	407,8	407,1
	L <sub>13</sub>	407,3	408,0	407,6

От данните се вижда, че стойностите на фазните и линейните напрежения за 100% от периода на измерване са в допустимия диапазон от  $\pm 10\% U_n$  (от 207 до 253 V и от 360 до 440 V), регламентирани в БДС EN 50160.

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават.

За оценка на краткотрайните изменения се използва стойността на фликера. В Таблица 3 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фликера за всяка фаза, при различни честоти, на които работи честотния преобразувател - 50Hz, 45Hz, 40Hz и 35Hz.

Вижда се, че в 100% от случаите стойността на фликера и за трите фази е в допустимата норма - не надвишава 1.

- *Токове*

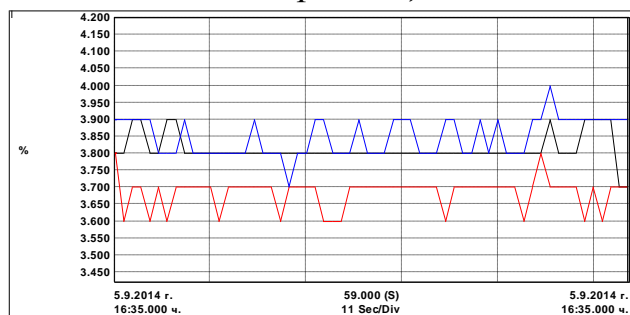
На фиг. 2 е показано изменението на тока в трите фази. Натоварванията на отделните фази са: за L<sub>1</sub> между 2,0 и 2,1А; за L<sub>2</sub> между 2,3 и 2,4А; за L<sub>3</sub> между 2,4 и 2,5А. Средното натоварване за L<sub>1</sub> е 2,0А, за L<sub>2</sub> е 2,36А и за L<sub>3</sub> е 2,44А.

- *Несиметрия*

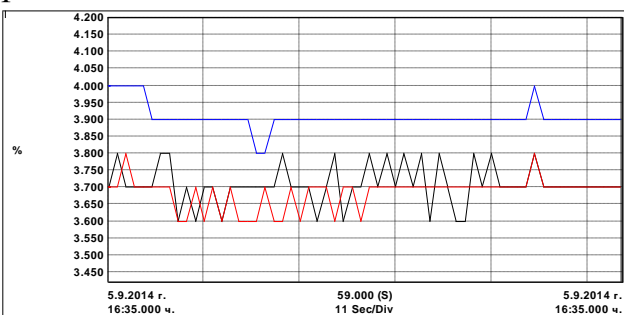
За несиметрията на напрежението са измерени минимална и средна стойност от 0,2% и максимална стойност от 0,3%. Измерената максималната стойност от 0,3% е под допустимите 2% в 100% от времето на измерване.

За несиметрията на токовете са измерени минимална от 8,7%, средна от 11,78% и максимална стойност от 13%. Несиметрията на токовете се дължи на работата на честотното управление, което е нормално за тези задвижвания.

- *Висши хармоници на тока и напрежението*



Фиг. 3. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения

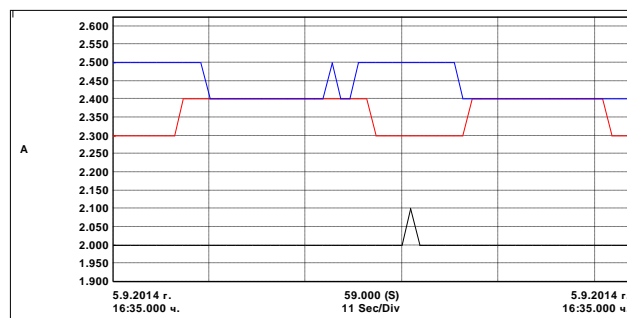


Фиг. 4. Общо хармонично изкривяване на линейните напрежения

На фиг. 3 и фиг. 4 е показано общото хармонично изкривяване, съответно на фазните и на линейните напрежения, в %. Максималните стойности на общото хармонично изкривяване, както на фазните напрежения (за L<sub>1</sub> е 3,9%, за

Таблица 3. Стойности на фликера

Фликер	Фаза	Стойност		
		мини-мална	макси-мална	средна
при 50Hz	L <sub>1</sub>	0,15	<b>0,56</b>	0,55
	L <sub>2</sub>	0,15	<b>0,52</b>	0,51
	L <sub>3</sub>	0,04	<b>0,44</b>	0,43
при 45Hz	L <sub>1</sub>	0,59	<b>0,60</b>	0,59
	L <sub>2</sub>	0,58	<b>0,61</b>	0,60
	L <sub>3</sub>	0,57	<b>0,59</b>	0,57
при 40Hz	L <sub>1</sub>	0,54	<b>0,57</b>	0,55
	L <sub>2</sub>	0,55	<b>0,57</b>	0,56
	L <sub>3</sub>	0,48	<b>0,51</b>	0,49
при 35Hz	L <sub>1</sub>	0,46	<b>0,53</b>	0,46
	L <sub>2</sub>	0,47	<b>0,48</b>	0,47
	L <sub>3</sub>	0,47	<b>0,52</b>	0,47

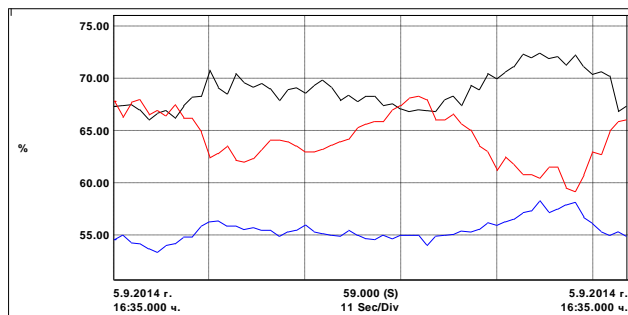


Фиг. 2. Стойности на фазните токове

$L_2$  е 3,8% и за  $L_3$  е 4,0%), така и на линейните напрежения (за  $L_{12}$  и  $L_{13}$  е 3,8%, за  $L_{23}$  е 4,0%) отговарят на нормите дадени в БДС EN 50160, който регламентира големината на общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение да не превишава 8%.

На фиг. 5 е показано общото хармонично изкривяване на фазните токове, а в Таблица 4 измерените минимални, максимални и средни стойности.

В 100% измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете са по-високи от допустимата стойност от 25% дадена в БДС IEC 61000-3-4 [3].



Фиг. 5. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

Таблица 4. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
<b>THD<sub>i</sub></b> , %	L <sub>1</sub>	66,0	72,4	68,9
	L <sub>2</sub>	59,2	68,3	64,3
	L <sub>3</sub>	53,4	58,3	55,5

В Таблица 5 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на линейното напрежение. Наблюдават 3, 5, 7, 9, 11 и 13 хармоник на напрежението. Всички те са много по-ниски от допустимите норми дадени в БДС EN 50160. От четните хармоници на напрежението се наблюдава само 12 хармоник с максимална стойност от 0,1%, която е по-ниска от допустимата норма от 0,2%.

Таблица 5. Хармоници на линейното напрежение

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L <sub>12</sub>	L <sub>23</sub>	L <sub>13</sub>
3	5,0	0,2	0,5	0,6
5	6,0	3,8	3,7	3,9
7	5,0	0,7	0,8	0,8
9	1,5	0,2	0,1	0,1
11	3,5	0,5	0,5	0,5
13	3,0	0,2	0,2	0,2

Таблица 6. Хармоници на фазните токове

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 61000-3-4, %	Максимална измерена стойност, %		
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
3	21,6	12,9	18,4	17,7
5	20,7	56,6	54,0	45,3
7	7,2	39,7	35,5	30,3
9	3,8	3,2	3,5	2,3
11	3,1	10,4	7,4	6,4
13	2,0	10,9	8,9	6,6
15	0,7	2,3	2,4	1,3
17	1,2	6,8	4,6	4,3
19	1,1	6,5	4,6	3,7
21	0,6	3,0	2,7	2,0
23	0,9	5,2	3,5	3,0
25	0,8	4,9	3,5	2,8

Получените експериментални резултати за хармониците на тока са обработени и систематизирани в Таблица 6 и Таблица 7, като е направено и сравнение със съществуващите стандарти [2, 3]. Налични са всички нечетни

хармоници на тока до 25 хармоник. Всички измерени максимални стойности на хармониците на тока, с изключение на 3 и 9 хармоник са значително по-високи от регламентираните допустими стойности в БДС IEC 61000-3-4.

В Таблица 7 са дадени стойностите на четните хармоници на тока отчетени за целия измервателен период, като са сравнени с допустимите стойности по БДС IEC 61000-3-4. Наблюдават се 2, 4, 6, 8 и 10 хармоник, като всички измерени стойности са под допустимата норма.

- *Фактор на мощността*

Достигнатите максимални стойности на фактора на мощността са: за  $L_1$  – 0,834, за  $L_2$  – 0,849, за  $L_3$  – 0,869. Средните стойности са: за  $L_1$  – 0,823, за  $L_2$  – 0,829, за  $L_3$  – 0,862. Тези стойности са съответно с 4,25% за  $L_1$ , с 6,12% за  $L_2$ , и с 8,63% за  $L_3$ , по-големи от номиналния фактор на мощността 0,8.

Средните стойности на фактора на мощността при несинусоидален режим са: за  $L_1$  – 0,989, за  $L_2$  – 0,982, за  $L_3$  – 0,999.

- *Активна, реактивна и пълна мощност*

В Таблица 8 са дадени минималната, средната и максималната стойност на измерените активна, реактивна и пълна мощност.

Наблюдава се консумация на реактивна мощност, което се дължи на асинхронния двигател. Консумацията на реактивна мощност от асинхронните двигатели зависи от номиналната мощност, честотата на въртене и натоварването им.

Таблица 7. Стойности на четните хармоници на фазните токове

Хармоник	Максимална, %	Допустима, %
2	3,3	4,0
4	1,8	2,0
6	1,2	1,3
8	0,9	1,0
10	0,5	0,6

Таблица 8. Активна, реактивна и пълна мощност

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	средна	максимална
<b>P, kW</b>	L <sub>1</sub>	378,6	389,5	401,7
	L <sub>2</sub>	435,9	459,9	484,9
	L <sub>3</sub>	473,1	495,2	510,3
	сумарна	1335,6	1344,7	1356,5
<b>Q, kVAr</b>	L <sub>1</sub>	-9,36	10,7	39,1
	L <sub>2</sub>	78,2	86,3	92,6
	L <sub>3</sub>	-33,2	-13,2	7,3
	сумарна	77,8	83,8	89,8
<b>S, kVA</b>	L <sub>1</sub>	467,1	473,2	483,0
	L <sub>2</sub>	538,6	554,9	571,2
	L <sub>3</sub>	556,8	574,6	589,3
	сумарна	1592,4	1602,6	1618,1

### 3.2. Изследване на показателите за качество на електрическата енергия при работа на двигателя със софтстартер

За контролна точка за провеждане на измерванията е избрана отново к. т. 1, намираща се на входа на софтстартера (фиг. 1). В случая честотното управление на двигателя е заменено със софтстартер.

- *Честота на захранващото напрежение*

Максималната стойност на честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е 50.02 Hz, минималната е 49.99 Hz, а средната - 50.00 Hz.

Следователно в 100% от случаите честотата на захранващото напрежение е в допустимите норми.

- *Захранващо напрежение*

В Таблица 9 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фазните и на линейните напрежения за периода на измерване.

Максималното отклонение на фазното напрежение е  $L_1=1,52\%$ ,  $L_2=L_3=1,48\%$ , а на линейното напрежение е  $L_{12}=0,83\%$ ,  $L_{23}=L_{13}=1,43\%$ . Вижда се, че за 100% от периода на измерване всички измерени стойности на фазните и линейните напрежения са в допустимия диапазон от  $\pm 10\% U_n$  (от 207 до 253 V и от 360 до 440 V), регламентирани в БДС EN 50160.

Таблица 9. Стойности на фазните и на линейните напрежения

Величина	Фаза	Стойност		
		мини-мална	макси-мална	средна
фазно напрежение, V	L <sub>1</sub>	233,0	233,5	233,3
	L <sub>2</sub>	233,1	233,4	233,2
	L <sub>3</sub>	234,0	234,4	234,3
линейно напрежение, V	L <sub>12</sub>	402,7	403,3	403,0
	L <sub>23</sub>	405,1	405,7	405,4
	L <sub>13</sub>	404,7	405,7	405,3

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават.

В Таблица 10 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фликера за всяка фаза. В 100% от случаите стойността на фликера и за трите фази е в допустимата норма - не надвишава 1.

Таблица 10. Стойности на фликера

Величина	Фаза	Стойност		
		мини-мална	макси-мална	средна
фликер	L <sub>1</sub>	0,17	<b>0,19</b>	0,18
	L <sub>2</sub>	0,19	<b>0,19</b>	0,19
	L <sub>3</sub>	0,18	<b>0,19</b>	0,19

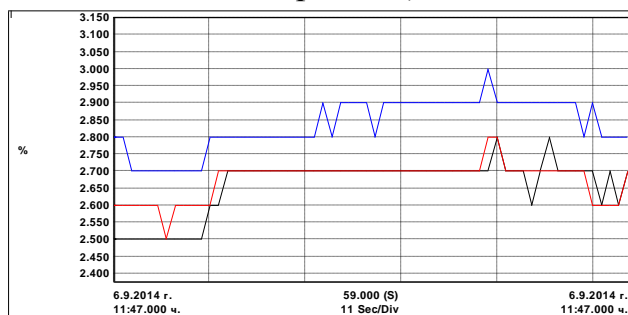
- *Токове*

Натоварванията на отделните фази са: за фаза L<sub>1</sub> – 2,4А; за фаза L<sub>2</sub> – 2,5А; за фаза L<sub>3</sub> – 2,6А.

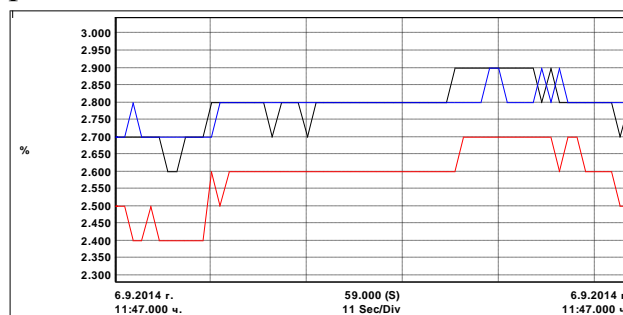
- *Несиметрия*

Измерената стойност на несиметрията на напрежението е 0,3% и е под допустимата стойност от 2% в 100% от времето на измерване. Измерената стойност на несиметрията на токовете е 4%.

- *Висши хармоници на тока и напрежението*



Фиг. 6. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения

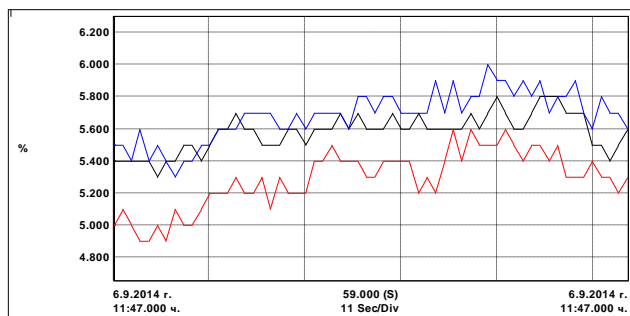


Фиг. 7. Общо хармонично изкривяване на линейните напрежения

На фиг. 6 и фиг. 7 е показано общото хармонично изкривяване, съответно

на фазните и на линейните напрежения, в %. Максималните стойности на общото хармонично изкривяване, както на фазните напрежения (за  $L_1$  и за  $L_3 - 2,9\%$ , за  $L_2 - 2,7\%$ ), така и на линейните напрежения (за  $L_{12}$  и за  $L_{23} - 2,8\%$ , за  $L_{13} - 3,0\%$ ) отговарят на нормите дадени в БДС EN 50160 - не се превишава допустимата норма от 8%.

На фиг. 8 е показано общото хармонично изкривяване на токовете в трите фази. В Таблица 11 са дадени измерените минимални, максимални и средни стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове. В 100% измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете са под допустимата стойност от 25% дадена в БДС IEC 61000-3-4 [3].



Фиг. 8. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

Таблица 11. Стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
Athd, %	L <sub>1</sub>	5,3	5,8	5,58
	L <sub>2</sub>	4,9	5,6	5,29
	L <sub>3</sub>	5,3	6,0	5,68

В Таблица 12 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на линейното напрежение. Наблюдават се 3, 5, 7, 9, 11, 13 и 17 хармоник. Всички те са много по-ниски от допустимите норми дадени в БДС EN 50160. Четни хармоници на напрежението не се наблюдават.

Таблица 12. Хармоници на линейното напрежение

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L <sub>12</sub>	L <sub>23</sub>	L <sub>13</sub>
3	5,0	0,2	0	0,6
5	6,0	2,7	2,7	2,9
7	5,0	0,6	0,5	0,6
9	1,5	0,1	0,1	0
11	3,5	0,6	0,5	0,5
13	3,0	0,4	0,4	0,3
17	2,0	0,1	0,1	0,1

Таблица 13. Хармоници на фазните токове

Хармоник	Допустима стойност по 61000-3-4, %	Максимална измерена стойност, %		
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
2	4,0	0,8	0,6	0,6
3	21,6	1,3	0,8	1,7
5	20,7	5,7	5,5	5,8
7	7,2	0,7	0,6	0,6
11	3,1	0,6	0,6	0,5
13	2,0	0,4	0,4	0

Измерените хармоници на тока са дадени в Таблица 13, като е направено и сравнение със съществуващите стандарти [2, 3].

От нечетните хармоници на тока са измерени стойности на 3, 5, 7, 11 и 13 хармоник, които са значително по-ниски от регламентираните допустими стойности в БДС IEC 61000-3-4. От четните хармоници на тока се наблюдава само 2 хармоник с максимална стойност от 0,8%, която е много по-ниска от



допустимата норма от 4% дадена в БДС IEC61000-3-4[3].

- *Фактор на мощността*

Достигнатите максимални стойности на фактора на мощността са съответно: за  $L_1 - 0,671$ , за  $L_2 - 0,630$ , за  $L_3 - 0,664$ .

- *Активна, реактивна и пълна мощност*

В Таблица 14 са дадени минималната, средната и максималната стойност на измерените активна, реактивна и пълна мощност.

Таблица 14. Активна, реактивна и пълна мощност

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	средна	максимална
<b>P, kW</b>	L <sub>1</sub>	372,6	376,7	381,2
	L <sub>2</sub>	355,3	361,9	370,6
	L <sub>3</sub>	398,3	403,6	410,7
	сумарна	1126,6	1142,3	1162,5
<b>Q, kVAr</b>	L <sub>1</sub>	418,8	421,8	424,8
	L <sub>2</sub>	449,7	452,7	456,8
	L <sub>3</sub>	450,4	453,7	456,8
	сумарна	1324,1	1328,2	1332,9
<b>S, kVA</b>	L <sub>1</sub>	562,4	565,8	569,5
	L <sub>2</sub>	574,9	580,3	588,1
	L <sub>3</sub>	612,2	615,2	619,1
	сумарна	1749,8	1761,3	1776,7

#### 4. Заключение

След анализ и оценка на резултатите от двете измервания могат да се направят следните изводи:

- Изследваното електрообзавеждане с честотен преобразувател не оказва влияние върху честотата на захранващото напрежение.

- И при двете проведени измервания, измерените стойности на фазните и линейните напрежения са в допустимите норми от  $\pm 10\% U_N$ .

- При използване на честотен преобразувател е измерена средна стойност на фликера от 0,56, а на софтстартер – от 0,19. Стойностите на фликера са по-малки от допустимата стойност 1, но се наблюдава близо 3 пъти увеличаване на стойността на фликера при използване на честотен преобразувател. Причината може да се търси в работата на самия честотен преобразувател.

- От резултатите е видно, че измерените токове, при работа на двигателя с честотен преобразувател са средно с 9,5% по-малки от токовете при работа на двигателя със софтстартер. При втория случай несиметрията на токовете от 4% е много по-малка от първия случай – с честотен преобразувател от 11,78%.

- И при двете измервания максималната стойност на несиметрията на напрежението е 0,3%, и е много по-ниска от допустимата стойност от 2%.

- При използване на честотен преобразувател за управление на двигателя средната стойност на общото хармонично изкривяване на напрежението е 3,87%, а със софтстартер – 2,87%. И в двата случая общото хармонично изкривяване е много под допустимата стойност от 8%.

- Средната стойност на общото хармонично изкривяване на тока при наличие на честотен преобразувател е 62,9% (много по-висока от допустимата стойност от 25%), а със софтстартер е 5,52% (в нормата). Следователно използването на честотен преобразувател в случая води до повече от 11 пъти по-високи нива на общото хармонично изкривяване, в сравнение с работа на задвижването със софтстартер.

- При работа с честотен преобразувател са измерени 3, 5, 7, 9, 11 и 13 хармоник на напрежението, а от четните само 2 хармоник. При работа със софтстартер са измерени 3, 5, 7, 11, 13 и 17 хармоник, а четни хармоници не се наблюдават. Всички измерени хармоници са в допустимите норми, като нивото на 5 хармоник е с 1% по-ниско при работа на двигателя със софтстартер.

- При работа с честотен преобразувател са налични всички нечетни хармоници на тока - от 3 до 25 хармоник, като само 3 и 9 хармоник са в допустимата норма. От четните хармоници на тока са измерени стойности на 2, 4, 6, 8 и 10, като всички са в допустимите норми. При работа със софтстартер са измерени 3, 5, 7, 11 и 13 хармоник на тока, а от четните само 2 хармоник, като всички измерени хармоници са много по-малки от допустимите норми.

- Реактивната мощност при работа на двигателя с честотно управление е само 89,8kVAr, а без него е значителна – 1332,9kVAr. В резултат на това, средния фактор на мощността при работа с честотен преобразувател е 0,838, а със софтстартер е 0,655. В първия случай двигателя работи средно с около 22% по-висок фактор на мощността.

Може да се обобщи, че използването на честотно управление влияе върху някои от показателите за качество на електрическата енергия – несиметрия, несинусоидалност, фликер.

### **Благодарности**

Изследванията в тази публикация са проведени благодарение на подкрепата на НИС при ТУ-София, договор № 141ПД0055-01.

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1] Цанев Ц., С. Цветкова, *Качество на електрическата енергия*, Авангард Прима, София, 2011.

[2] БДС EN 50160 *Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи*, 2006.

[3] БДС IEC 61000-3-4 *Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16А*, 1998.

**Автори:** Светлана Цветкова, доц. д-р – катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, *email:* [stzvet@tu-sofia.bg](mailto:stzvet@tu-sofia.bg); Николай Стоманярски, маг. инж. – катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, *email:* [nstomaniarski@tu-sofia.bg](mailto:nstomaniarski@tu-sofia.bg); Ангел Петлешков, гл. ас. – катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, *email:* [apetl@tu-sofia.bg](mailto:apetl@tu-sofia.bg).