

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ НА АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ СЪС СИНУСОИДАЛНА ШИМ В МАТЛАБ СРЕДА

иван костов георги иванов

Резюме: Докладът представя симулационно изследване на хармоничния състав на изходното напрежение и изходния/мрежовия ток на асинхронни електрозадвижвания с преобразуватели на честота (ПЧ) и автономни инвертори на напрежение със синусоидална ШИМ. За целта е разработен симулационен модел за анализ на периодични несинусоидални сигнали, който включва асинхронен двигател, преобразувател на честота, трифазен генератор на синусоидална ШИМ и хармоничен анализатор. Получени са количествени интегрални оценки на периодичните несинусоидални токове и напрежения по закона за честотно управление $U/f = \text{const}$. Анализът е проведен в среда Simulink с инструмента FFT Analysis Tool на графичния потребителски интерфейс на SimPowerSystem Toolbox на Matlab. Направени са изводи за възможността за използване на тези преобразуватели директно за захранване на асинхронни двигатели в експлоатация и за целите на изпитването им.

Ключови думи: електромагнитна съвместимост, асинхронни електрозадвижвания, хармоничен спектър, бързо преобразуване на Фурие (БПФ).

STUDY ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF INDUCTION DRIVES WITH SINUSOIDAL PWM IN MATLAB ENVIRONMENT

ivan kostov georgi ivanov

Abstract: This paper presents a simulation study of the harmonic composition of the output voltage and output/line currents in induction motor electric drives using frequency converters and autonomous voltage inverter with sinusoidal PWM. For this purpose a simulation model for the analysis of non-sinusoidal periodic signals was developed. The model includes induction motor, frequency converter, three-phase sinusoidal PWM generator and harmonic analyzer. The quantitative integrated assessments of non-sinusoidal periodic currents and voltages are obtained based on the $U/f = \text{const}$ frequency control law. The analysis was carried out in Simulink environment by the FFT Analysis Tool with graphical user interface in SimPower System Toolbox for Matlab. Conclusions are drawn about the possibility of using these converters directly for the supply of induction motors in operation/testing mode.

Keywords: electromagnetic compatibility, induction motor electric drives, harmonic spectra, fast Fourier transform (FFT).

1. Въведение

Електромагнитната съвместимост (ЕМС) много често се определя като способността на сигнал и шум да съжителстват без загуба на информация, съдържаща се в предавания сигнал [4,5]. В съвременен и по-широк смисъл, с масовото навлизане в индустрията на нелинейни полупроводникови преобразователни устройства за електрозадвижвания, а и не само за тях, под електромагнитна съвместимост на полупроводниковите устройства за промишлено електрозахранване или електроенергийна система на автономен обект се разбира способността им за едновременно функциониране без да се нарушават зададените режими на работа при запазване на техническите и експлоатационни режими за срока на експлоатация на електрооборудването [3].

Въздействието на статичните преобразователи се изразява в два аспекта:

- генериране в мрежата на хармоници на напрежение и ток с различна физическа природа;
- консумиране от мрежата на реактивна мощност.

Определящ е първият аспект на ЕМС. Един начин за намаляване на въздействието на хармоничните е генериране на напрежение с определени характеристики на хармоничния състав. Преобразователите на честота с междинно звено за постоянен ток притежават много богати възможности за формиране на изходното напрежение, отмествайки честотата на хармоничните на изходното напрежение в областта на високите честоти благодарение на бързите превключващи елементи [1,2].

Един от най-използваните начини на модулиране на изходното напрежение на ПЧ е широчинно-импулсната модулация (ШИМ). Конкретните реализации, в зависимост от изпълнението на определени критерии, най-често отнасящи се за ток, напрежение, обратни връзки и др., могат да се класифицират както следва [3,4]:

- o ШИМ, базирана на носеща честота (синусоидална ШИМ - SPWM);
- o ШИМ с елиминирание на избрани хармонични (SHEPWM);
- o ШИМ с минимизация на пулсациите на тока;
- o пространствено-векторна ШИМ (SVPWM);
- o случайна ШИМ;
- o следяща хистерезисна ШИМ;
- o следяща непрекъсната/дискретна ШИМ;
- o хибридна ШИМ;
- o адаптивна ШИМ;
- o синхронна/асинхронна ШИМ.

Докладът е опит да бъде даден отговор на въпроса за хармоничния състав на изходното напрежение и ток за един вид модулационна техника – синусоидална ШИМ. Изследването е проведено с математични методи за анализ на статични режими на основата на класическата теория на хармоничния анализ, подпомогнати от симулиращи програми. Крайните резултати са представени в табличен и графичен вид.

2. Показатели на хармоничния състав

За оценка на несинусоидалните периодични величини на анализираното електрозадвижване в този доклад са използвани следните характеристични коефициенти [1,3]: на нелинейните изкривявания (k_{THD}); на деформиране (k_{D}), на хармоника (k_v) и претегления коефициент на несинусоидалност (k_{HVF}). Предмет на оценки са ефективната стойност на статорното линейно напрежение (U) и на първия му хармоник (U_1), статорният линейен ток (I) и линейният ток на мрежата (I_{NET}). За напрежението тези параметри имат следните изрази [6,7]:

$$k_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1}, \quad (1)$$

$$k_{\text{D}} = \frac{U_1}{U}, \quad (2)$$

$$k_f = \frac{U}{U_{\text{AV}}}, \quad (3)$$

$$k_{\text{HVF}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v}}}{U_1}, \quad (4)$$

$$k_v = \frac{U_v}{U_1}, \quad (5)$$

За определяне на k_{D} се използва също връзката:

$$k_{\text{D}} = \frac{1}{\sqrt{k_{\text{THD}}^2 + 1}}, \quad (6)$$

Трябва да се има предвид, че възможността за експлоатацията на двигателите по мощност се ограничава от 1 до 0.7 при изменение на k_{HVF} от 0.030 до 0.115 [6].

3. Математичен анализ на модулирани периодични сигнали

ШИМ модулираното изходно напрежение се описва с изрази [2]:

$$u_a = 0.5mU_d \sin(\omega t + \psi) + F(M\omega_c \pm N\omega), \quad (7)$$

Тук $m=U_m/U_c$ е модулационният индекс; U_m , U_c – амплитуди на модулиращата и носещата честоти; $\omega=2\pi f$ – ъглова скорост на модулирания сигнал; $\omega_c=2\pi f_c$ – ъглова скорост на носещата честота; U_d – изправено напрежение на входа на инвертора; ψ – фазово отместване на модулирания сигнал; $F(M\omega_c \pm N\omega)$ - остатъчна функция, сума от високочестотни хармонични съставлящи.

То съдържа хармонични, зависими от носещата честота и концентрирани около кратните h на носещата M както следва:

За $h=\omega_c/\omega=50$ в табл.1 са дадени хармоничните съставлящи v за кратните M на синусоидалната ШИМ, $M+N$ е цяло нечетно число.

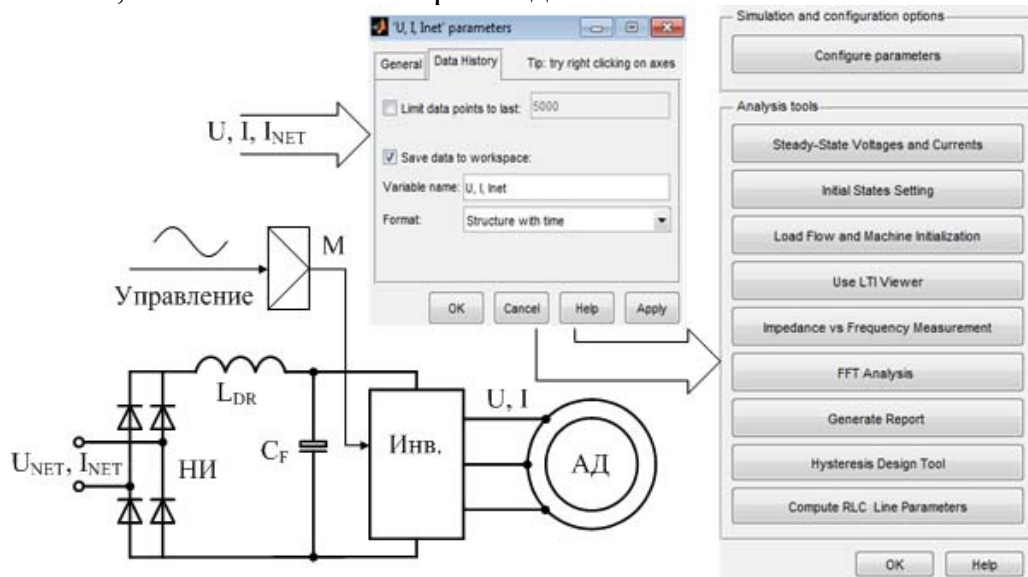
Таблица 1. Хармоничен спектър на синусоидална ШИМ

N		M				
$2 \times M + 1$	$2 \times M$	1	2	3	4	
0	± 1	50ω	$100\omega \pm 1\omega$	150ω	$200\omega \pm 1\omega$	
± 2	± 3	$50\omega \pm 2\omega$	$100\omega \pm 3\omega$	$150\omega \pm 2\omega$	$200\omega \pm 3\omega$	
± 4	± 5	$50\omega \pm 4\omega$	$100\omega \pm 5\omega$	$150\omega \pm 4\omega$	$200\omega \pm 5\omega$	
± 6	± 7	$50\omega \pm 6\omega$	$100\omega \pm 7\omega$	$150\omega \pm 6\omega$	$200\omega \pm 7\omega$	
± 8	± 9	$50\omega \pm 8\omega$	$100\omega \pm 9\omega$	$150\omega \pm 8\omega$	$200\omega \pm 9\omega$	
.....						

Най-често няма точни изрази за определяне на хармоничния състав. Затова сигналите се моделират, а за оценките се използват техники за бързо преобразуване на Фурие – БПФ (FFT).

4. Параметри на модела, начални условия и диапазон на изменение на анализираните величини

На основата на анализа е разработен модел (фиг.1) на честотно асинхронно електрозадвижване, състоящо се от идеализиран еднофазен източник на променливо напрежение с ефективна стойност на напрежението $U_{NET} = 220 \text{ V}$, ПЧ с МЗПТ и асинхронен двигател.



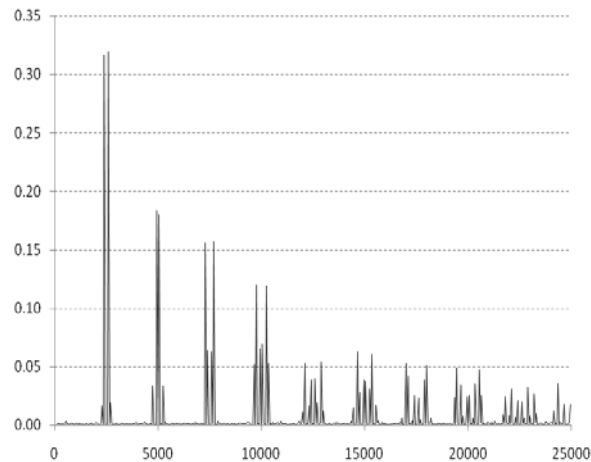
Фиг.1. Модел на електрозадвижването и на хармоничния анализатор. HI – неуправляем изправител; Инв. – инвертор; L_{DR} , C_F – елементи на МЗПТ; M – трифазен синусоидален модулатор на напрежение.

Изправителят е двупътен с параметри на МЗПТ $L_{DR} = 0.4 \text{ mH}$ и $C_F = 180 \mu\text{F}$. Инверторът работи със синусоидална ШИМ и носеща честота $f_c = 5 (2.5) \text{ kHz}$ и максимална стойност на постоянното напрежение $U_{DC} = 220\sqrt{2} \text{ V}$. Моделът на АД с $P_N = 750 \text{ W}$, $\omega_n = 1410 \text{ min}^{-1}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $f_n = 50 \text{ Hz}$; $z_p = 2$ е с параметри на заместващата схема: $R_s = 10.2 \Omega$; $L_s = 0.026 \text{ H}$; $R_r = 10.52 \Omega$; $L_r = 0.061 \text{ H}$; $L_m = 0.457 \text{ H}$. FFT-анализаторът на графичния потребителски интерфейс на SimPowerSystem ToolBox на Simulink работи със Structure with Time формат на измервателния инструмент, съхранявани във Workspace. Максималното време на стъпката на квантоване в модела е

ограничено и е под 2 μ s. Машината работи в режим на празен ход по закона $U/f=\text{const}$.

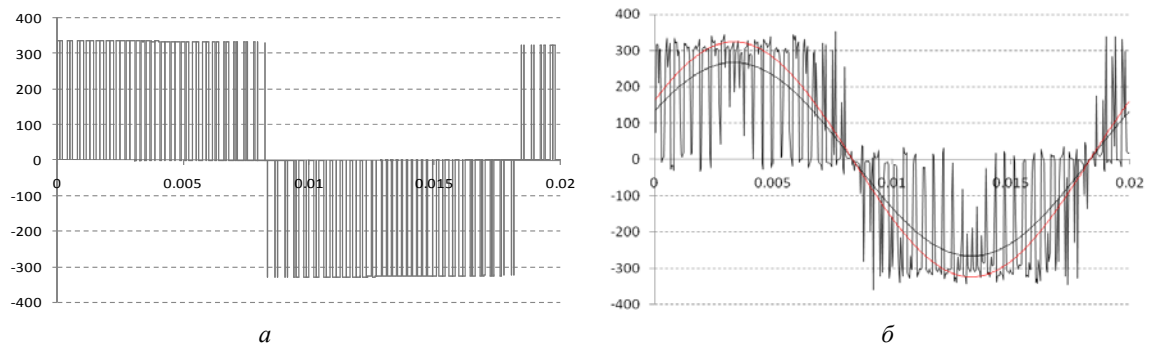
4. Основни резултати

На фиг.2 е показан резултатът от работата на ШИМ и хармоничния анализатор за напрежението на двигателя U при $f = 50\text{Hz}$. Изчислени са първите 500 хармонични. $U_1=189\text{ V}$; $k_{\text{THD}}=68.72\%$; $k_d=0.824$; $U=229\text{ V}$.

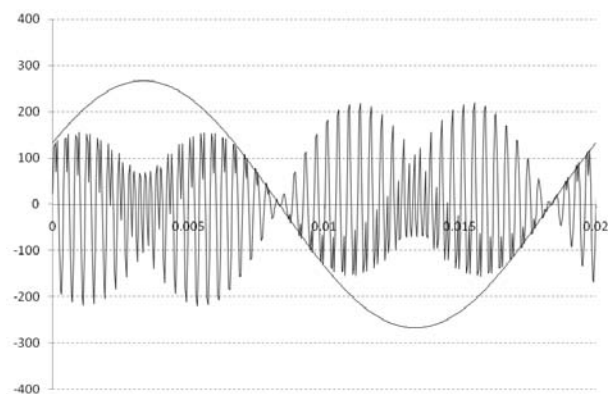


Фиг.2. Хармоничен състав (k_v) на напрежението на изхода на ПЧ. $f_c=2500\text{ Hz}$, $f=50\text{ Hz}$, $m=1$.

На фиг.3 са показани вида на генерирания ШИМ сигнал (а), на възстановеното линейно напрежение, на първия хармоник ($U_1=189\text{V}$) и на ефективната му стойност $U=229\text{V}$ (б).

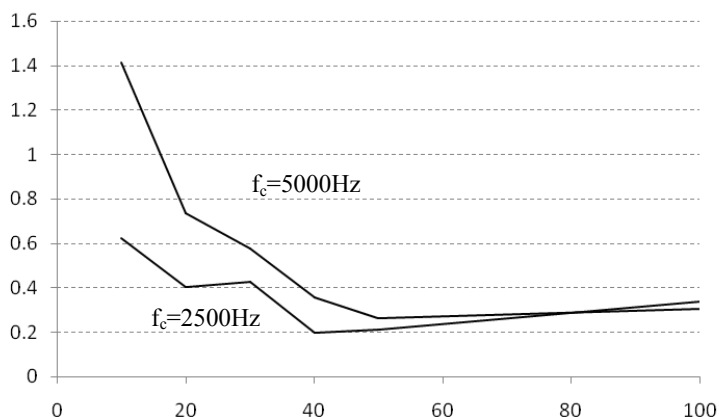


Фиг.3. Ефективна стойност на линейното напрежение, на първия му хармоник и възстановена форма на изходното напрежение. U, V ; t, s .



Фиг.4. Вид на основната хармонична и сумата от първите $M=1\ldots 9$ хармонични. U, V ; t, s .

Получени са (фиг.5) следните оценки за показателите на хармоничния състав при управление на двигателя по закона $U/f=\text{const}$:



Фиг.5. Зависимост на k_{HVF} (%) от честотата (Hz) на ПЧ за първите 13 хармоници и две стойности на носещата честота. $U/f=\text{const}$.

Таблица 2. Оценки на показатели на хармоничния състав на изходното напрежение на ПЧ при $f_c = 5000\text{Hz}$, режим на празен ход на двигателя.

Честота	Напрежение линейно	Коефициент на формата	Коефициент на нелинейните изкривявания	Коефициент на деформиране	Претеглен коефициент на нелинейните изкривявания
f	U, U_1	k_f	k_{THD}	k_d	k_{HVF}
Hz	V	-	-	-	%
100	229,189	1.34	0.69	0.83	0.31
50	229, 189	1.34	0.69	0.83	0.26
40	205, 150	1.52	0.92	0.74	0.36
30	176, 113	1.74	1.21	0.64	0.58
20	144, 76	2.13	1.65	0.52	0.74
10	101, 37	3.05	2.54	0.37	1.41

Таблица 3. Оценки на показатели на хармоничния състав на изходното напрежение на ПЧ при $f_c = 2500\text{Hz}$, режим на празен ход на двигателя.

Честота	Напрежение линейно	Коефициент на формата	Коефициент на нелинейните изкривявания	Коефициент на деформиране	Претеглен коефициент на нелинейните изкривявания
f	U, U_1	k_f	k_{THD}	k_d	k_{HVF}
Hz	V	-	-	-	%
100	229, 189	1.34	0.69	0.82	0.34
50	229, 189	1.34	0.69	0.82	0.21
40	205, 150	1.50	0.67	0.83	0.20
30	176, 113	1.74	1.21	0.64	0.42
20	144, 76	2.13	1.65	0.52	0.40
10	101, 37	3.02	2.54	0.37	0.62

Таблица 4. Оценки на показатели на хармоничния състав на изходния ток на ПЧ при $f_c = 2500/5000\text{Hz}$, режим на празен ход на двигателя.

Честота	Ток линеен	Коефициент на формата	Коефициент на нелинейните изкривявания	Коефициент на деформиране
f	I, I_1	k_f	k_{THD}	k_d
Hz	A	-	-	-
100	0.36, 0.32	1.1250	0.0600	0.9982
50	0.71, 0.64	1.1094	0.0300	0.9996
40	0.71, 0.64	1.1094	0.0204	0.9997
30	0.71, 0.64	1.1094	0.0227	0.9997
20	0.71, 0.64	1.1094	0.0250	0.9997
10	0.66, 0.58	1.1379	0.0372	0.9993

Таблица 5. Оценки на показатели на хармоничния състав на мрежовия ток на ПЧ при $f_c = 2500/5000\text{Hz}$, режим на празен ход на двигателя.

Честота	Ток мрежов	Коефициент на формата	Коефициент на нелинейните изкривявания	Коефициент на деформиране
f	I_{NET}, I_{INET}	k_f	k_{THD}	k_d
Hz	A	-	-	-
100	0.145, 0.044	3.2955	2.1300	0.4250
50	0.24, 0.08	3.0000	1.9800	0.4508
40	0.22, 0.07	3.1429	2.0000	0.4472
30	0.22, 0.07	3.1429	2.0000	0.4472
20	0.21, 0.065	3.2308	2.0200	0.4437
10	0.1, 0.061	3.1148	2.0500	0.4384

6. Заключение

1. Предложен е подход за изследване на електромагнитната съвместимост на честотни асинхронни ЕЗ с ПЧ, основан на FFT-анализатора на графичния потребителски интерфейс на SimPowerSystem ToolBox на Simulink.
2. Подходът е приложим за различни типове модулация като е изследван един вид синусоидална ШИМ.
3. Получени са оценки на показатели на хармоничния състав. Най-важната от тях е претегленият коефициент на несинусоидалност (k_{HVF}).
4. Изследването показва, че до около 10Hz коефициентът k_{HVF} на преобразувателите със синусоидална ШИМ е под 0.015, което е предпоставка за използване на АД без ограничение на изходната мощност. Тук не се включва изискването за принудително охлаждане на машината при ниски честоти. По-лошият претеглен коефициент на несинусоидалност при по-големите честоти вероятно се дължи на увеличаване на остатъчната функция.
5. Да се разработят методики за проектиране на филтри с цел подобряване на електромагнитната съвместимост на преобразувателите на честота.
6. Разработеният модел и подход са основа за провеждане на сравнителни изследвания на различни видове модулация.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bose B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, 2002, pp.711.
- [2] R. Krishnan, *Electric Motor Drives. Modeling, Analysis, and Control*, Singapore, 2003, ISBN 81-297-0319-1, pp.650.
- [3] Bose B., *Power Electronics and Motor Drives - Advances and Trends*, Academic press, 2006, pp.915.
- [4] Marian P.Kazmierkowski, R. Krishnan, Frede Blaabjerg, *Control in Power Electronics*, 2002, Elsevier Science, USA, pp.518.
- [5] Arrillaga J., B.C.Smith, N.R.Watson, A.R.Wood, *Power System Harmonic Analysis*, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0 471 97548 6.
- [6] Костов И., Ш. Узунов, Е. Мустафа, Т. Ангелова, *Експериментални изследвания на хармоничния състав на напрежението в асинхронни честотни електрозадвижвания*, IV-та национална научна конференция за студенти, докторанти и млади научни работници, Технически университет – София, филиал Пловдив, 30.04.2011 г.
- [7] Kostov I., D. Spirov, *Power quality analysis in frequency induction motor drives*, Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 16, 2011 International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys 2011 BULGARIA, pp. 191-153.

Автори: Иван Костов, доц. д-р – ТУ - София, филиал Пловдив, катедра „Системи за управление”, *email:* ijk@tu-plovdiv.bg, Георги Иванов, редовен докторант – ТУ - София, филиал Пловдив, катедра „Системи за управление”, *email:* georgi.iwanow@gmail.com.