



СИНТЕЗ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОКОВЕТЕ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАЩА СИСТЕМА С ЕДНОФАЗНОТРИФАЗЕН ЦИКЛОКОНВЕРТОР

SYNTHESIS AND STUDY OF THE CURRENTS OF ELECTRO DRIVE SYSTEM WITH SINGLE TREE PHASE CYCLOCONVERTER

Цветозар Петков*
ТУ-Габрово

Статията е постъпила на 15.05.2013 г.; приета за отпечатване на 30.05.2013 г.

Abstract

The paper presents a way of theoretical synthesis and study about electrical drive system with induction motor and direct frequency converter. The result of the synthesis is nonsinusoidal form of the phase currents for different frequencies. The representative vector of the stator current is found and important conclusions are made. The form of the stator's current allows a spectral analysis on the Fourier transform, which is an important part of the engineering studies.

Keywords: циклоконвертор; асинхронен двигател; спектрален анализ; изобразяващ вектор.

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на съвременните технологии, повишаването на производствените мощности и нарастването на населението в световен мащаб, изискват все повече енергия, което при ограничените природни ресурси налага търсенето, изследването и внедряването на енергийно ефективни системи, използващи рационално енергията, изпълняващи надеждно и точно зададената технологична задача. В световен мащаб над две трети от електрическата енергия се преобразува в механична работа, което се извършва от електрическите двигатели – най-големите консуматори на електроенергия. Този факт налага търсенето на нови технически решения в областта на електрозадвижващата техника, като основното направление в изграждането на тези системи е използването на най-надеждния и с просто конструктивно устройство асинхронен двигател (АД). Съвременните методи и технически средства за управление позволяват използването му в широк мащаб в различни области на индустрията и бита, което прави асинхронния електродвигател с най-голям дял от използваните в електрозадвижващите системи [1, 2]. Преимуществата на честотните методи за управление на АД налагат търсене на решения в преобразователната техника - важна задача в изграждането и приложението на електрозадвижващи системи. Едно от възможните решения е използването на непосредствен преобразувател на честота (НПЧ) за управлението на асинхронния двигател, като за изследването на свойствата на електрозадвижващата система е необходимо да се анализират особеностите на управлението и да се направят изводи относно бъдещи изследвания и приложения. Съвременната компютърна техника и софтуер позволяват решението на тази задача. Разработените софтуерни продукти позволяват ко-

ректни теоретични изследвания и приложения в съответствие с изискванията на съвременната инженерна наука [3,4].

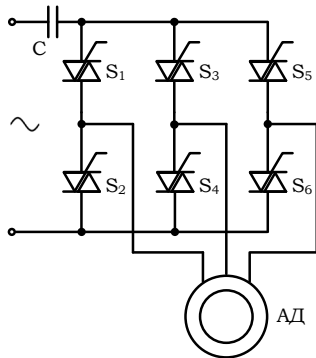
ИЗЛОЖЕНИЕ

Правилният избор на тип честотопреобразувател при проектирането на електрозадвижваща система с АД зависи от конкретните особености на задвижвания механизъм, изискванията за точност, обезпечаването на работата в различни режими и др. Широките възможности на автономните инвертори позволяват постигането на широк диапазон на регулиране на скоростта, повишена динамика на електрозадвижването и работа с високи енергетични показатели. В случаите на работа на асинхронната машина в режим на генераторно спиране междинното звено за постоянен ток налага използването на втори инвертор, обезпечаваш рекуперацията на енергията в мрежата. Няколкократно преобразуване от променлив в постоянен вид на електрическата енергия е съпътствано със загуби, които могат да бъдат намалени посредством непосредствен преобразувател на честота, характеризиращ се с еднократно преобразуване. Използването на НПЧ в случаите на работа на асинхронния двигател в режими на рекуперация на енергия и динамично спиране, може да бъде по-ефективно. Поради това, използването на НПЧ като честотопреобразувател с еднократно преобразуване на енергията в областта на електрозадвижващите системи е целесъобразно в много от случаите, а практическата реализация на тези възможности представлява актуално направление в преобразователната техника. [5 - 8].

В настоящата работа се разглежда разработката, анализа и изследването на електрозадвижваща система, изградена на базата на непосредствен преобразувател на

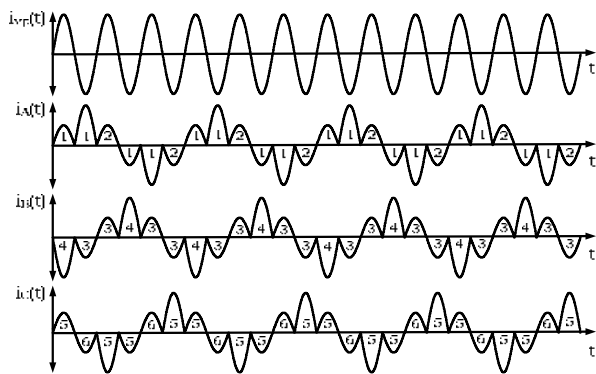
* Тел.:066827311; e-mail:tsvetozar_petkov@mail.bg

честота от циклоконверторен тип и асинхронен електродвигател с накъсосъединен ротор. Силовият преобразувател е изграден от шест симисторни елемента, включени по показания на фиг. 1 начин и кондензатор, свързан последователно в първичната верига.

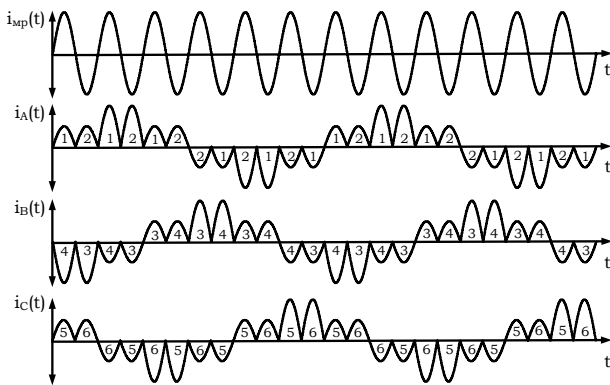


Фиг. 1. Схема на електрозадвижващата система

Последователността на комутация на вентилните елементи определя работа с различни честоти с по-ниска стойност и кратна на три на захранващата. На фиг. 2 и 3 са показани времедиаграмите, описващи принципа на действие и последователността на работа на вентилните елементи, определена от последователността на прилагане на управляващи импулси.



Фиг. 2. Форми на токовете за честота $f_{mp} / 3$

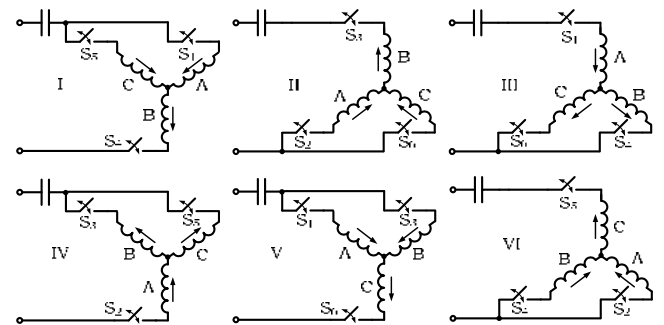


Фиг. 3. Форми на токовете за честота $f_{mp} / 6$

Както е видно от фиг. 2 и 3, импулсите за управление се прилагат в момента, когато токът от захранващата мрежа преминава през нулева стойност. Такъв начин на управление определя минимално ниво на висши хармоници, генерирани в захранващата мрежа вследствие на управлението, като нивото им се определя от нелинейностите на магнитната верига и на вентилните елементи [9, 10].

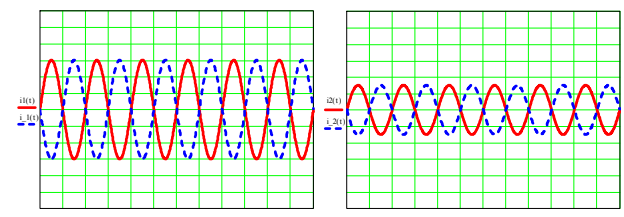
За изследването на свойствата на електрозадвижващата система е необходима теоретична постановка, на базата на която да се направят изводи относно нейните свойства и възможните и приложения. Протичането на несинусоидални токове в статорните намотки на АД определя наличието на хармонични съставки, определяйки електромагнитни полета, въртящи се с различни скорости и посока (с изключение на трети и кратните на него хармоници), като влиянието им върху енергичните и механични показатели представлява основна задача на инженерното изследване. Определянето на хармоничния състав на статорните токове в теоретичен аспект изисква математическия синтез на формата на токовете за отделните честоти и разложението им в ред на Фурие с помощта на съвременен софтуерен продукт. Определянето на аналитичен израз за несинусоидалните функции на изходните напрежения (токове) е затруднено, дори в много от случаите е невъзможно. Поради тази причина са разработени различни методи, като метода на хармоничния анализ, на комутационните матрици, на превключващите функции и др. [7, 8]. За изследването на предлаганата система се подхожда към синтез на формата на токовете посредством третия метод, като получените резултати се изследват посредством хармоничен анализ. В настоящите изследвания е използван продукта Mathcad, притежаващ гъвкав интерфейс и подходящи математически инструменти за теоретично изследване [4].

Съгласно принципа на действие на електрозадвижващата система, циклоконверторът присъединява различно за всеки полупериод намотките на асинхронния двигател. Възможните присъединения са показани на фиг. 4, като в зависимост от работната честота последователността на присъединенията се променя.



Фиг. 4 Възможни присъединения на статорните намотки на асинхронния електродвигател

Съгласно присъединенията, показани на фиг. 4, следва, че стойността на тока в последователното присъединение е два пъти по-голяма от токовете в паралелното присъединение. За синтеза на статорните токове се изхожда от тази особеност, като се записват базови синусоидални функции, намиращи се в противофаза с амплитуди единица и два пъти по-ниска от нея, формата на които са показани на фиг. 5.



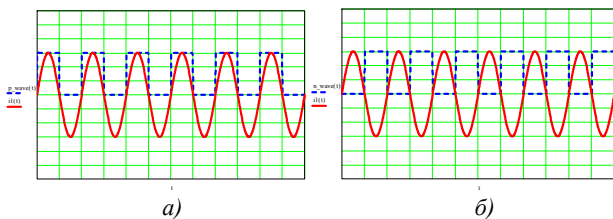
Фиг. 5. Базови синусоидални функции

За правилната работа на електрозадвижващата система за различните честоти е необходимо фазните намотки на асинхронния електродвигател да се превключват в зависимост от поляритета на полупериодите на мрежовия ток. Това налага сформирването на импулсни функции, указващи съответния поляритет. Необходимите импулсни функции се реализират в Mathcad посредством цикли с условие, съставени относно основната синусоидална функция на мрежовия ток, както следва:

$$p_wave(t) = if(il(t) \geq 0, 1, 0) \quad (1)$$

$$n_wave(t) = if(il(t) \leq 0, 1, 0) \quad (2)$$

В резултат на сравнението се получават функции синхронизирани по полупериодите на мрежовия ток показани на фиг. 6.



Фиг. 6. Функции, синхронизирани по положителните и отрицателни полупериоди съотв. „а“ и „б“ на мрежовия ток

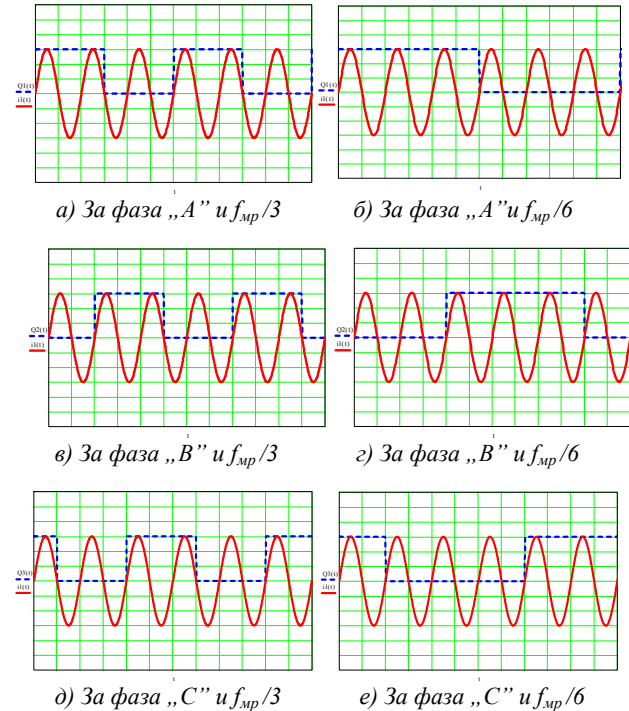
Изследваната електрозадвижваща система преобразува както честотата, така и броя на фазите, като е необходимо осигуряване на съответните фазови ъгли на протичащите токове в статорните намотки. За коректното синтезиране на формата на токовете е необходимо задаване на единични функции, определящи гореспомнатите условия. Като опорна за сравнение функция се използва основната единична синусоидална функция. За осигуряване на цикличност се извършва сравнение на остатъка от целочисленото делене на текущата стойност на времето със стойността на полупериода на основния хармоник на фазовия ток и съответния интервал във времето, указващ необходимия фазов ъгъл. След определянето им, за правилния синтез на формата на фазните токове са необходими и съответните им инверсни функции. Съставянето на функциите се извършва отново с цикъл с условие, който има следния вид:

$$Q1(t) = if\left(\text{mod}(t, nT) < n\frac{T}{2}, 1, 0\right) \quad (3)$$

$$Q2(t) = if\left(\frac{nT}{3} < \text{mod}(t, nT) < \frac{5nT}{6}, 1, 0\right) \quad (4)$$

$$Q3(t) = if\left(\frac{nT}{6} < \text{mod}(t, nT) < \frac{2nT}{3}, 1, 0\right) \quad (5)$$

В резултат на сравнението се получават единични функции, указващи работната честота и необходимата фазова разлика между статорните токове, показани на фиг. 7.



Фиг. 7. Функции определящи фазовата разлика и работната честота

Получените функции почленно се умножават логически с импулсите синхронизирани по полупериодите на мрежовия ток, както следва:

$$Sp_i = p_wave(t) \wedge Q_i(t) \quad (6)$$

$$Sn_i = n_wave(t) \wedge Q_i(t) \quad (7)$$

където: i – номер на съответната единична превключваща функция.

Съответно се определят инверсните функции:

$$\overline{Sp}_i = p_wave(t) \wedge \overline{Q}_i(t) \quad (8)$$

$$\overline{Sn}_i = n_wave(t) \wedge \overline{Q}_i(t) \quad (9)$$

Функциите Sp_i, Sn_i и $\overline{Sp}_i, \overline{Sn}_i$ се събират логически и полученият резултат е поредици от импулси, определящи последователността на комутацията на вентилните елементи:

$$L_1(t) = Sp_1 \vee \overline{Sn}_1 \quad (10)$$

$$L_2(t) = \overline{Sp}_1 \vee Sn_1 \quad (11)$$

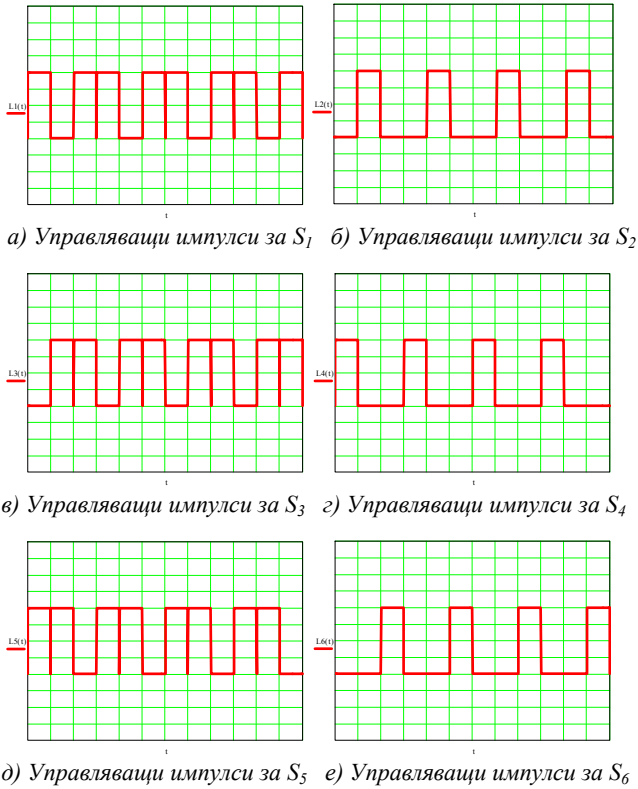
$$L_3(t) = Sp_2 \vee \overline{Sn}_2 \quad (12)$$

$$L_4(t) = \overline{Sp}_2 \vee Sn_2 \quad (13)$$

$$L_5(t) = Sp_3 \vee \overline{Sn}_3 \quad (14)$$

$$L_6(t) = \overline{Sp}_3 \vee Sn_3 \quad (15)$$

Функциите $L_1(t) \div L_6(t)$, представляват поредиците импулси, необходими за прилагането към управляващите електроди на вентилните елементи на циклоконвертора, като съответните индекси съвпадат с индексите на симисторите от схемата на фиг. 1. Управляващите импулси са показани на фиг. 8.



Фиг. 8. Поредици импулси за управление

За синтезирането на формата на фазните токове е необходимо отчитането на едновременната работа на вентилните елементи в структурата на преобразувателя. За тази цел последователно се умножават всички импулсни функции с единичните синусоидални, както следва:

$$M_1(t) = L_1(t) \overline{i_2(t)} \quad N_1(t) = L_1(t) \overline{i_1(t)} \quad (16)$$

$$M_1(t) = L_2(t) \overline{i_2(t)} \quad N_2(t) = L_2(t) \overline{i_1(t)} \quad (17)$$

$$M_3(t) = L_3(t) \overline{i_2(t)} \quad N_3(t) = L_3(t) \overline{i_1(t)} \quad (18)$$

$$M_4(t) = L_4(t) \overline{i_2(t)} \quad N_4(t) = L_4(t) \overline{i_1(t)} \quad (19)$$

$$M_5(t) = L_5(t) \overline{i_2(t)} \quad N_5(t) = L_5(t) \overline{i_1(t)} \quad (20)$$

$$M_6(t) = L_6(t) \overline{i_2(t)} \quad N_6(t) = L_6(t) \overline{i_1(t)} \quad (21)$$

За определяне на моментите, в които фазните токове имат амплитудни стойности I_m или $I_m / 2$, се въвеждат следните логически функции, получени чрез умножение по модул от две:

$$F_1(t) = Q_2(t) \oplus Q_3(t) \quad (22)$$

$$F_2(t) = Q_1(t) \oplus Q_3(t) \quad (23)$$

$$F_3(t) = Q_1(t) \oplus Q_2(t) \quad (24)$$

Извършват се следните преобразувания:

$$M_{12}(t) = [M_1(t) + M_2(t)] F_1(t) \quad (25)$$

$$M_{34}(t) = [M_3(t) + M_4(t)] F_2(t) \quad (26)$$

$$M_{56}(t) = [M_5(t) + M_6(t)] F_3(t) \quad (27)$$

$$N_{12}(t) = [N_1(t) + N_2(t)] \overline{F_1(t)} \quad (28)$$

$$N_{34}(t) = [N_3(t) + N_4(t)] \overline{F_2(t)} \quad (29)$$

$$N_{56}(t) = [N_5(t) + N_6(t)] \overline{F_3(t)} \quad (30)$$

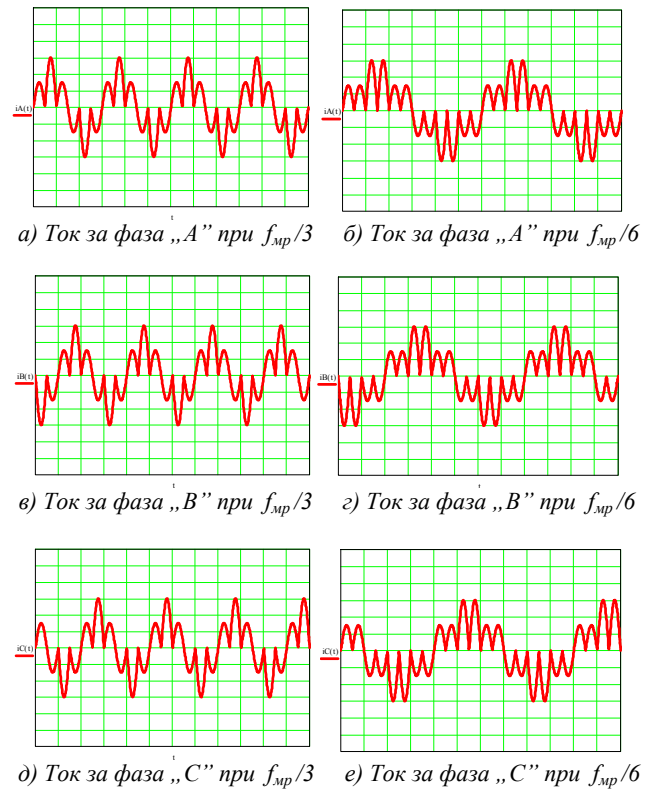
Окончателно за формата на токовете, протичащи в статорните намотки на асинхронния електродвигател, се получава:

$$i_A(t) = M_{12}(t) + N_{12}(t) \quad (31)$$

$$i_B(t) = M_{34}(t) + N_{34}(t) \quad (32)$$

$$i_C(t) = M_{56}(t) + N_{56}(t) \quad (33)$$

Формата на синтезираните криви на токовете за две честоти - $f_{mp}/3$ и $f_{mp}/6$, са показани на фиг. 9.



Фиг. 9. Форма на фазните токове за различни честоти

От формата на токовете в трифазната система се вижда, че за всички честоти се удовлетворява условието:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (34)$$

Това може да се докаже от математическия модел, синтезиран в Mathcad, след като се запише:

$$iA(t) + iB(t) + iC(t) =$$

0
0
0
0
0
0
0
...

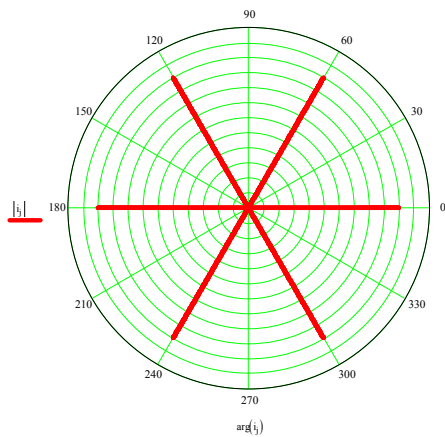
Фиг. 10. Сума от моментните стойности на токовете във времето

Тази особеност позволява определянето на ходографа на изобразяващия вектор на статорния ток, респ. на магнитовъзбудителното напрежение и на пълния магнитен поток, колинеарни и пропорционални един на друг [1, 2]. Съгласно класическата теория на изобразяващите вектори за анализ на електрически машини, за трифазна система, удовлетворяваща условие (34), изобразяващият вектор се дефинира както следва [1, 2]:

$$\bar{i}_S = \frac{2}{3}(i_A + ai_B + a^2i_C) \quad (35)$$

където: $a = e^{j\frac{2}{3}\pi}$ - оператор определящ пространственото разположение на отделните магнитни оси на намотките.

Тази зависимост определя ходографа на изобразяващия вектор на статорния ток, който за всички честоти има вида, показан на фиг. 11.



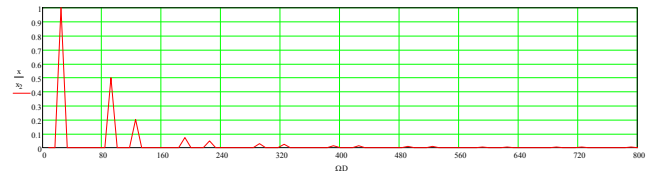
Фиг. 11. Ходограф на изобразяващия вектор на статорния ток

Определянето на вида на изобразяващия вектор на статорния ток спомага за направата на важни изводи относно вида на електромагнитното поле и подхода към анализ на системата. Както е видно, за всеки полупериод електродвигателят се присъединява към захранващата схема, като съгласно фиг. 4 положението на вектора на статорния ток в пространството се определя от типа присъединение, което се променя в моментите, когато фазните токове преминават през нулева стойност. Това означава, че характерът на движението на вектора на пълния магнитен поток на статора в пространството е такъв, че не предизвиква индуктиране на е.д.н в отделните намотки вследствие на пространственото си движение, а индуктираните от него електродвижещи напрежения са предизвикани от изменението на модула му за всяко едно пространствено положение. Това представлява важна особеност, която трябва да се отчита в подхода за математически анализ и разработка на общ модел на състоянието, обхващащ преходните и установени режими на работа.

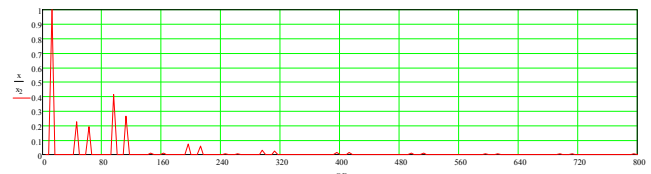
Несинусоидалните периодични токове в статорните намотки на АД образуват въртящо се електромагнитно поле, което може да се представи посредством алгебрична сума от еквивалентното действие на висшите хармонични на токовете, предизвикващи съставящи на полето, въртящи се с различна скорост и посока [5, 6]. Съгласно теорията, електромагнитният момент на машината се определя от сумарното действие на всички

хармонични съставящи. Отчитането на влиянието на отделните хармонични върху механичните характеристики е важно при определяне свойствата и приложението на електродвигателната система. Наличието на хармонични с определен номер и амплитуда предизвиква появата на провал в механичната характеристика, като при достатъчна големина на провала и достатъчна стойност на съпротивителния момент е възможна устойчива работа на ниска скорост в неработния участък на механичната характеристика [1,2,8].

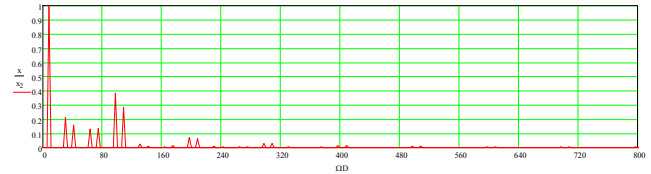
За количествено определяне стойностите на отделните хармонични е необходимо разложение в ред на Фурие на формите на фазните токове от фиг. 9. На фиг. 12 са показани резултатите от спектралния анализ на хармоничния състав на ток за една фаза на електродвигателя за различни честоти в относителни стойности спрямо амплитудата на първи хармоник.



а) Спектрален анализ на ток за фаза при $f_{mr}/3$



б) Спектрален анализ на ток за фаза при $f_{mr}/6$



в) Спектрален анализ на ток за фаза при $f_{mr}/9$

Фиг. 12. Спектрален анализ за различни работни честоти

По-подходяща форма за представяне на резултатите от хармоничния анализ на тока в една фаза на АД е табличната. В табл. 1, 2 и 3 са показани тези резултати за три честоти за $f_{mr}/3$, $f_{mr}/6$ и $f_{mr}/9$.

Таблица 1

номер хармоник	$\frac{I_v}{I_1}$	честота [Hz]
$\nu = 1$	1	16,667
$\nu = 5$	0,5	83,333
$\nu = 7$	0,2	116,667
$\nu = 11$	0,071	183,33
$\nu = 13$	0,05	216,667
$\nu = 17$	0,029	283,333
$\nu = 19$	0,023	316,667
$\nu = 23$	0,015	383,333
$\nu = 25$	0.013	416,667
$\nu = 29$	$9,58 \cdot 10^{-3}$	483,333
$\nu = 31$	$8,36 \cdot 10^{-3}$	516,667

Таблица 2

номер хармоник	$\frac{I_\nu}{I_1}$	честота [Hz]
$\nu = 1$	1	8,333
$\nu = 5$	0,228	41,667
$\nu = 7$	0,194	58,333
$\nu = 11$	0,412	91,667
$\nu = 13$	0,263	108,333
$\nu = 17$	0,01	141,667
$\nu = 19$	$7,94 \cdot 10^{-3}$	158,333
$\nu = 23$	0,071	191,667
$\nu = 25$	0,059	208,333
$\nu = 29$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	241,667
$\nu = 31$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	258,333

Таблица 3

номер хармоник	$\frac{I_\nu}{I_1}$	честота [Hz]
$\nu = 1$	1	5,556
$\nu = 5$	0,211	27,778
$\nu = 7$	0,161	38,889
$\nu = 11$	0,128	61,111
$\nu = 13$	0,134	72,222
$\nu = 17$	0,384	94,444
$\nu = 19$	0,286	105,556
$\nu = 23$	0,026	127,778
$\nu = 25$	$9,14 \cdot 10^{-3}$	138,889
$\nu = 29$	$6,52 \cdot 10^{-3}$	161,111
$\nu = 31$	0,013	172,222

Както се вижда от таблиците, при понижаване на работната честота намалява относителната стойност на пети хармоник, а се увеличава относителният дял на

единадесети и тринадесети хармоник. При честота $f_{\text{вр}}/9$ се увеличават седемнадесети и деветнадесети хармоник. Хармоничният анализ представлява основа за понататъшно изследване на механичните и енергетични свойства на електрозадвижването.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на базата на синтез на изходните токове при непосредствените преобразуватели на честота позволява да бъдат направени важни изводи относно свойствата на изследваните системи. В електрозадвижващите системи определянето на ходографите на изобразяващите вектори представлява основа за анализ на състоянието съгласно класическата теория. В изследвания случай се доказва, че индуктираните е.д.н. от пълния магнитен поток на статора зависят само от измененията на модула на изобразяващия го вектор. Възможностите на метода за синтез на изходните криви на токовете определят неговото приложение при изследвания на свойствата на НПЧ в електрозадвижванията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ключев, В. Теория на електрозадвижването. София, Техника, 1989.
- [2] Вольдек, А. Электрические машины. Ленинград, Энергия, 1978.
- [3] Тончев, Й. MATLAB - II ч., София, Техника, 2008.
- [4] Кирьянов, Д. Mathcad 13, Петербург, БХВ, 2006.
- [5] Жемеров, Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. Москва, Энергия, Москва, 1977.
- [6] Lander, C. Power Electronics, London, McGraw – Hill, 1993.
- [7] Фираго, И., С Готовский, А. Лисс, Тиристорные циклоконверторы. Минск, Наука и техника, 1973.
- [8] Чехет, Э., В. Мордач, В. Соболев. Непосредственные преобразователи частоты для электропривода, Киев, Наукова думка, 1988 г.
- [9] Genchev, L., Ts. Petkov. Frequency method for obtaining low velocities, ELMA'05, Sofia, 2005.
- [10] Петков, Ц. Пусково спирачно устройство за подемотранспортни машини, UNITEХ'06, Габрово, 2006.