

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХОДОГРАФИТЕ НА ИЗОБРАЯВАЩИТЕ ВЕКТОРИ НА ЕДНОФАЗНО-ТРИФАЗНО ЦИКЛОКОНВЕРТОРНО ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ**RESEARCH OF HODOGRAPHS OF REPRESENTATIVE VECTORS OF A SINGLE-THREE PHASE CYCLOCONVERTER ELECTRICAL DRIVE**

Цветозар Георгиев Петков*
Технически Университет Габрово

Статията е постъпила на 05 ноември 2015 г.; след ревизия на 04 март 2016 г.; приета за отпечатване на 08 март 2016 г.

Abstract

The paper deals with the results for representative vectors researches of induction motor stator and rotor currents. The motor is driven by single-three phase cycloconverter. The researches are based on simulation model created by means of block modeling package Simulink of MATLAB computer mathematical system. The operating principle and model simulated are discussed. The hodographs shapes of stator and rotor representative vectors for different values of frequency are shown. Important conclusions are done also.

Keywords: асинхронен двигател; изобразяващ вектор; ходограф; циклоконвертор; MATLAB-Simulink.

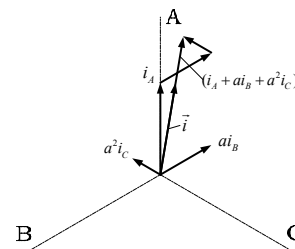
ВЪВЕДЕНИЕ

Теоретичните изследвания на електрозадвигващите системи се извършват по различни методи, предназначени за изследването на различни величини и показатели на системата, характеризиращи преобразуването на енергията от един вид в друг. Един от често използваните методи, описващ преходните и установени режими в електрическите машини, е методът на изобразяващите вектори. При протичането на ток през всяка една от намотките, създаденото магнитовъзбудително напрежение (м.в.н.) възбужда електромагнитно поле, разпределено във въздушната междина по определен закон и изменящо се във времето. Това м.в.н. на всяка намотка се представя с вектор, посоката на който съвпада с оста на намотката и модул, който се изменя при изменението на тока през намотката. При постоянство на въздушната междина и ненаситеност на магнитната верига съществува пропорционалност между векторите на м.в.н., пълния магнитен поток и тока през намотката. Теорията на изобразяващите вектори е подходяща за анализ и изследване на електрическите машини по време на установените и преходни процеси. Пространствените ходографи на векторите спомагат за направата на важни изводи относно свойствата на машината при различни начини на управление, което прави изследването гъвкаво и всеобхватно [1, 2, 3].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Машините за променлив ток обикновено са в трифазно изпълнение. Протичащите токове през трифазна симетрична намотка възбуждат три магнитни полета, на които отговарят три изобразяващи вектора за всяка фаза. При наслагването на отделните полета на фазите се

получава резултантно магнитно поле, което се представя с резултантен вектор, получен от сумата на изобразяващите вектори на токовете в отделните фази (фиг. 1).



Фиг. 1. Резултантен изобразяващ вектор на тока

На фиг. 1 посоката на токовете се приема за положителна, когато съвпада с оста на намотката. Тъй като моментните стойности на токовете във фазите са реални величини, то изобразяващите им вектори се получават, като се умножат с a и a^2 ($a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$) за фази В и С. При това изобразяващият вектор на тока за фаза А съвпада с i_A , тъй като се приема за съвпадаща с реалната ос. Резултантният изобразяващ вектор на тока се определя с израза:

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_A + ai_B + a^2i_C) \quad (1)$$

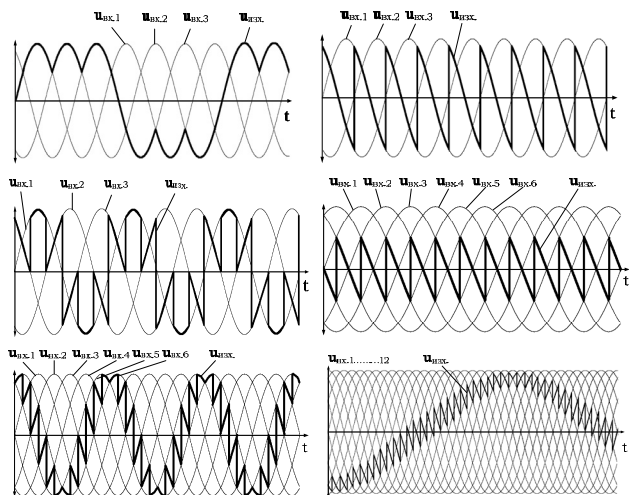
При определянето на изобразяващия вектор по (1) не се въвеждат ограничения относно изменението на фазните токове. Ако е изпълнено условието (2):

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (2)$$

* Тел. 066 827 258; e-mail: tsvetozar_petkov@mail.bg

то проекциите на изобразяващия вектор върху осите на намотките са равни на моментните стойности на съответните токове. При синусоидалност на протичащите токове формата на ходографа на изобразяващите вектори е окръжност, т.е налице е работа с константен модул [4, 5, 6].

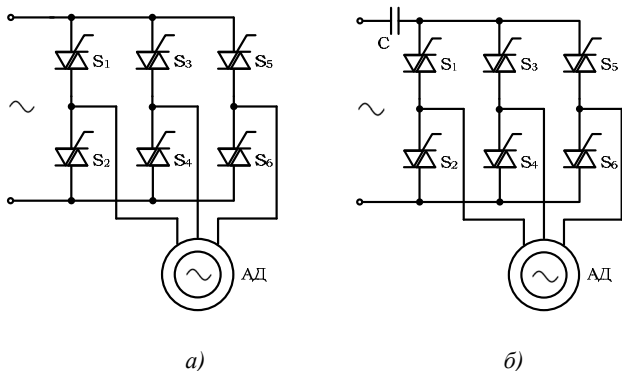
Характерна особеност при управление на променливотоковите машини с непосредствени преобразуватели на честота (НПЧ) е несинусоидалността на приложените напрежения, респ. токове, протичащи в намотките на машината фиг. 2 [7, 8, 9].



Фиг. 2. Типични форми на изходното напрежение на различни видове НПЧ при различни управления

В тези случаи формата на ходографите на изобразяващите вектори се различава от окръжност. При движението си векторът изменя както положението си, така и модула си. Индуцираните електродвижещи напрежения в тези случаи се разделят на две съставлящи – е.д.н., индуцирано вследствие на пространственото изменение на изобразяващия вектор на пълните магнитни потоци, наречено още е.д.н. на въртене и напрежения, индуцирани вследствие на изменението на модула на изобразяващия вектор на пълните магнитни потоци наречени трансформаторни е.д.н. [1, 5, 6].

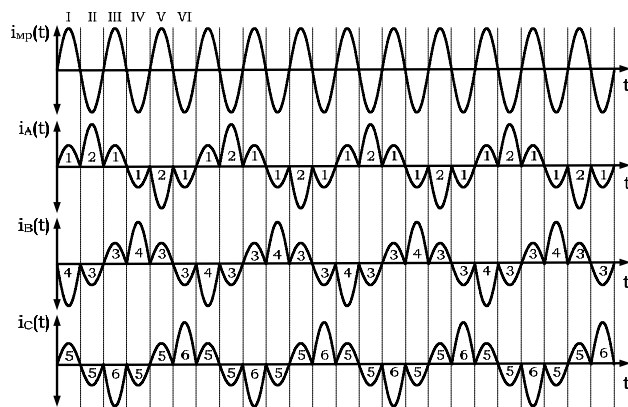
В настоящата работа са представени резултатите от изследване на ходографите на изобразяващите вектори на електрозадвижваща система с еднофазно-трифазен циклоконвертор и асинхронен електродвигател. Принципната схема на симулираната и изследвана система е показана на фиг. 3.



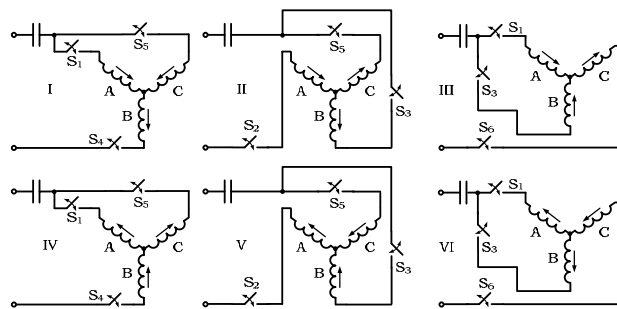
Фиг.3. Схеми на електрозадвижваща система с еднофазно-трифазен циклоконвертор и асинхронен електродвигател

В зависимост от последователността на подаване на управляващи импулси към вентилните елементи, в

статорните намотки на асинхронния електродвигател протича симетрична трифазна система токове, като възможните честоти са по-ниски и кратни на три от стойността на мрежовата. На фиг.4 са показани формите на токовете за честота, три пъти по-ниска от тази на захранващата мрежа $f_{MP} / 3$, а на фиг. 5 е показана последователността на свързване на статорните намотки за всеки полуцикл на мрежовото напрежение за същата работна честота.

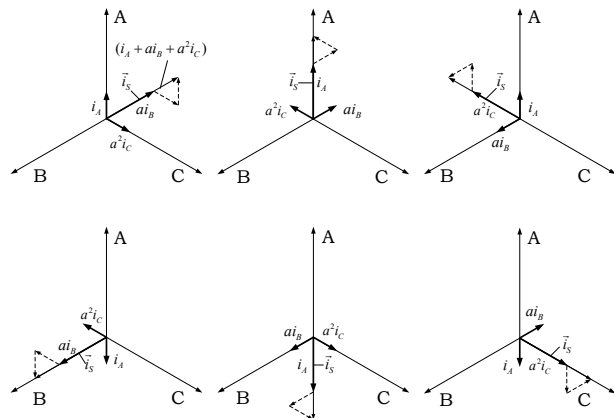


Фиг. 4. Времедиаграми описващи работата на еднофазно-трифазен мостов циклоконвертор



Фиг. 5. Последователност на свързване на статорните намотки за честота $f_{MP} / 3$

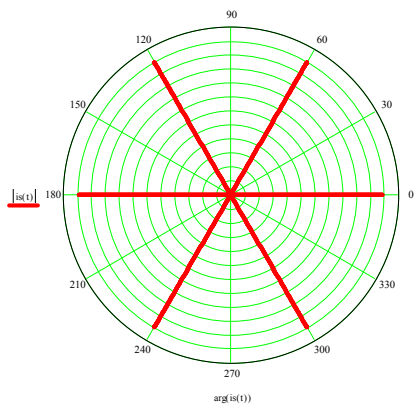
Както може да се види от фиг. 5, условие (2) се спазва, като изобразяващият вектор на статорните токове за всяко фазно съединение фиг. 5, е показан на фиг. 6.



Фиг. 6. Изобразяващ вектор на статорния ток

От фиг. 6 се вижда, че изобразяващият вектор на тока \vec{I}_s съвпада с направлението и модула на изобразяващия вектор на тока за фазата, която е присъединена по-

следователно на останалите две. Ходографът на изобразяващия вектор на статорния ток е един и същ за всички работни честоти и се определя по (1), като е изобразен посредством софтуерния продукт Mathcad на фиг. 7.



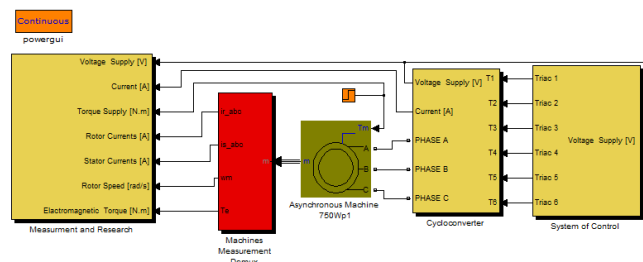
Фиг. 7. Ходограф на изобразяващия вектор на статорния ток

Определянето на вида на изобразяващия вектор на статорния ток спомага за съставянето на важни изводи относно характера на електромагнитното поле на статора. За всеки полупериод на мрежовия ток електродвигателят е присъединен към захранващата мрежа, като положението на вектора на статорния ток в пространството се определя от типа присъединение. Пространственото положение на изобразяващия вектор се променя в моментите, когато статорните токове преминават през нулева стойност, следователно пространственото движение на изобразяващия вектор на пълния статорен магнитен поток $\vec{\Psi}_S$ се извършва с нулев модул. Това означава, че характерът на движението на вектора на статорния пълн магнитен поток в пространството е такъв, че не предизвиква индуктиране на е.д.н. в отделните намотки вследствие на пространствено движение. Индуктираните от него е.д.н. са предизвикани само от изменението на модула му за всяко едно пространствено положение, т.е. те са трансформаторни е.д.н. Електромагнитното поле на статора е пулсиращо, като броят на пулсациите за определено пространствено положение се определя от работната честота.

Резултатите, представени дотук, са получени с идеализираните форми на статорните токове на асинхронния електродвигател. Отчитането на електромагнитното влияние на въртящия се ротор върху формата на статорните токове може да се извърши посредством симулация на системата с подходящ софтуерен продукт. Част от симулационните продукти се отличават със своята тясно специализирана насоченост, което определя приложението им в конкретна област. Разработката на всеобхватен в инженерните науки софтуер е перспективна задача, като водеща роля в това отношение е симулационното приложение Simulink в програмна среда MATLAB. Приложенията на продукта позволяват симулиране на системи и ситуации в разнообразни инженерни области, като електротехника, електроника, комуникационна и управляваща техника, както и в областта на машинното инженерство, навигационните системи и др. Адаптивен и гъвкав, изграден на базата на език от високо програмно ниво, Simulink е приспособим към изискванията на широк кръг потребители при решаването на различни инженерни задачи.

При работа в Simulink изследваната система се изгражда последователно с помощта на симулационните единици, предложени от продукта. Структурирането на

симулационен модел на циклоконверторното електрозадвижване се състои в изграждането на взаимосвързани функционални блокове, симулиращи основни възли от силовата и управляващата част на системата. Общ вид на разработения симулационен модел е показан на фиг. 8.



Фиг. 8. Общ вид на разработения симулационен модел

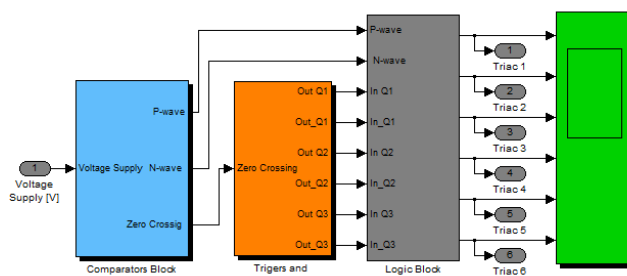
Симулацията е изградена от функционални подсистеми, като описанието е както следва:

Asynchronous Machine – модел на асинхронна машина, достъпен във виртуалните библиотеки на софтуерния продукт, като са въведени параметрите на асинхронен електродвигател T80A-2.[10];

Cycloconverter – съдържа симулационен модел на еднофазно-трифазен квазирезонансен циклоконвертор;

System of Control – симулационен модел на системата за управление на циклоконверторния преобразувател. Вътрешната структура съдържа взаимосвързани подсистеми, показана на фиг. 9.

Powergui – задължителен измервателен модул на симулация, съдържаща динамичен модел от раздел „SimPowerSystems”.



Фиг. 9. Вътрешна структура на подсистема System of Control

Описанието на функционалните блокове на подсистема System of Control е както следва:

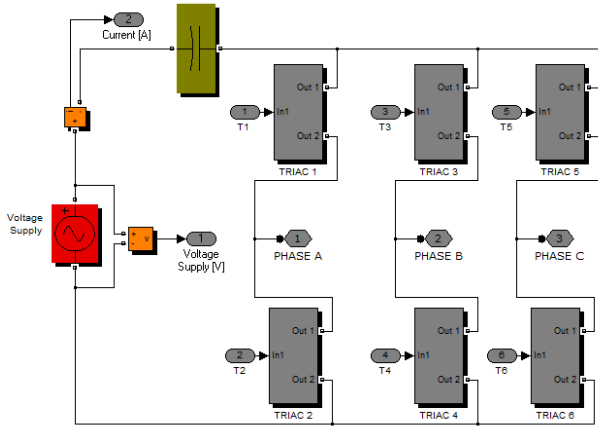
Comparators Block – симулационен модел на мрежов синхронизатор, предназначен за синхронизация по полупериодите на захранващото напрежение на преобразувателя;

Triggers and Counters Block – блок за сформирани на сигнали, определящи работната честота и фазовата разлика на токовете в статорните намотки на асинхронния електродвигател;

Logic Block – предназначен за логическа обработка на сформирани сигнали от предходните блокове;

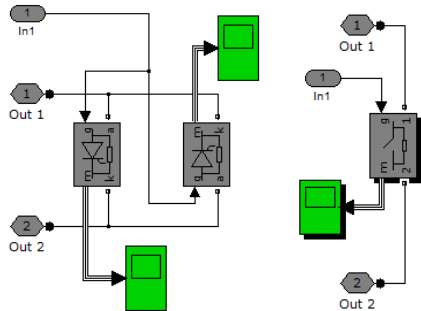
Measurement and Research – подсистема, предназначена за измерване, визуализация и изчисление на величини и характеристики.

За изграждането на симулационен модел на еднофазно-трифазен квазирезонансен циклоконвертор се използват шест двустранно проводими вентилни елементи и последователно свързан кондензатор в първичната верига. Общ вид на разработения симулационен модел е показан на фиг. 10.



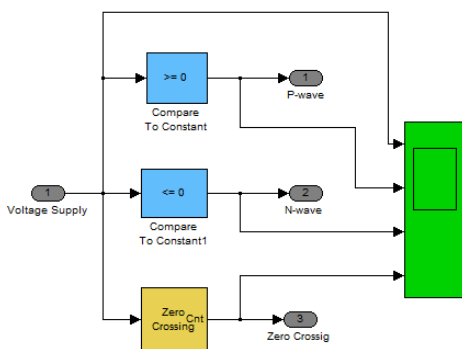
Фиг. 10. Симуляционен модел на еднофазно трифазен квазирезонансен циклоконвертор

Вентилните полупроводникови елементи са означени на схемата като TRIAC 1÷6, които се състоят от два насрещно свързани тиристора с обща връзка на управляващите електроди, или с помощта на идеализирани ключове, както е показано на фиг. 11.



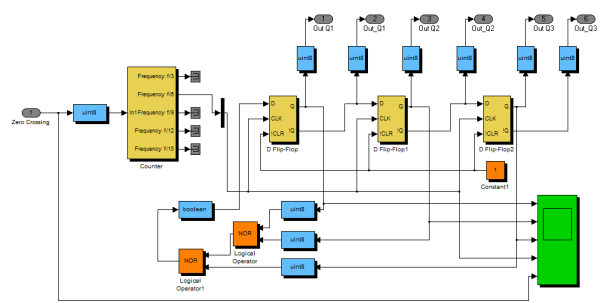
Фиг. 11. Вътрешна структура на вентилен елемент

Системата за управление е изградена от тригери, логически елементи, елементи за сравнение, структурата на която е показана на фиг. 12÷17.



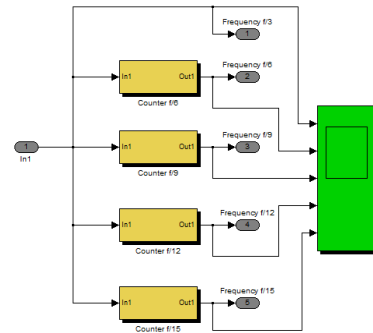
Фиг. 12. Структурна схема на блок за синхронизация

Определянето на необходимата фазова разлика между протичащите токове и различни работни честоти се реализира чрез подходящо управление на вентилните елементи. В структурата на модела е разработен функционален модул „Triggers and Counters Block”, изпълнен с D тригери и логически елементи. Той е предназначен за формиране на сигнали, задаващи необходимата фазовата разлика и работна честота.

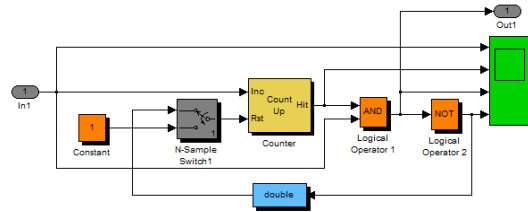


Фиг. 13. Структурна схема на функционален модул „Triggers and Counters Block”

Работната честота се задава от модул „Counter”. Модулът симулира работата на делител на честота с произволен коефициент на делене. Вътрешната структура на делителя на честота и на една от отделните му вътрешни подсистеми са показани на фиг. 14 и фиг. 15, съответно.



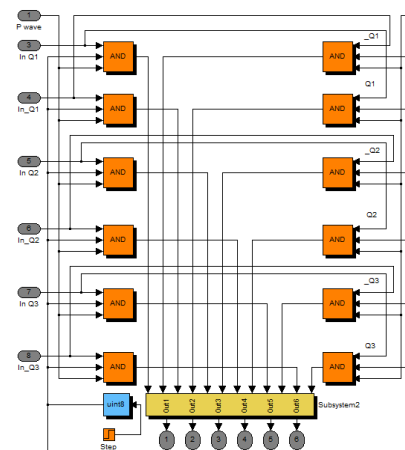
Фиг. 14. Структурна схема на модул „Counter”



Фиг. 15. Вътрешна структура на отделен брояч с произволен коефициент на делене

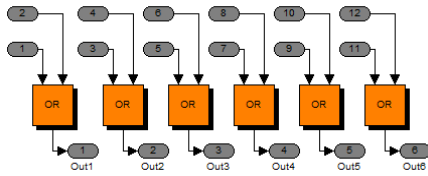
Получените логически сигнали от правите и инверсни изходи на тригерите, както и синхронизирани по полупериодите на захранващото напрежение служат като входни на следващия функционален блок от разработения симуляционен модел.

Окончателната цифрова обработка на така формираните импулси се извършва от логически блок, вътрешната структура на който е показана на фиг. 16.



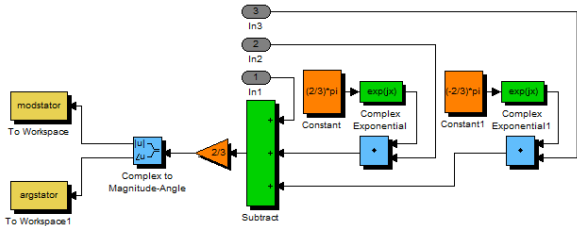
Фиг. 16. Вътрешна структура на функционален блок „Logic Block”

В състава на логическия блок е разработена подсистема „Subsystem2”, в която се извършва допълнителна логическа обработка на сигналите, получени от изходите на тривходовите логически елементи. Вътрешната структура е изградена от шест двуходови елемента „ИЛИ” и е показана на фиг. 17.



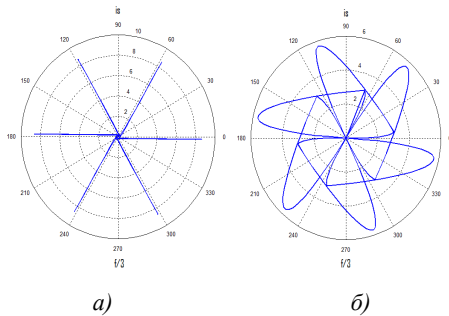
Фиг. 17. Вътрешна структура на функционален блок „Subsystem2”

За определяне на ходографите на изобразяващите вектори на статорните и роторни токове са разработени допълнителни блокове с аналогична структура, показана на фиг. 18.



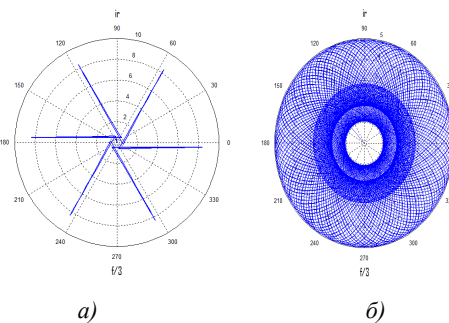
Фиг. 18. Подсистема за определяне на ходографите на статорните (роторни) токове

Резултатите от изследванията са показани за случаи, когато електродвигателят Т80А-2 работи в режим на късо съединение и при номинално натоварване в установен режим за различни работни честоти $f_{mp} / 3$ (фиг. 19, 20), $f_{mp} / 6$ (фиг. 21, 22), $f_{mp} / 9$ (фиг. 23, 24), $f_{mp} / 12$ (фиг. 25, 26).



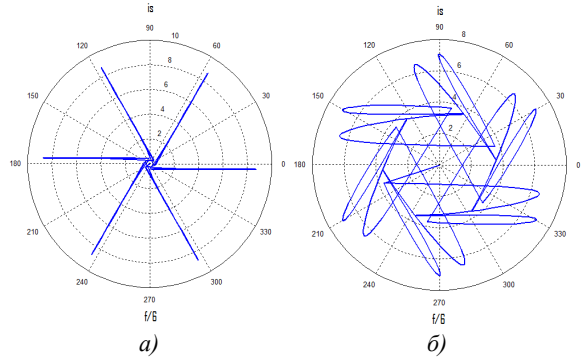
Фиг. 19. Ходографи на вектора на статорните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 3$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



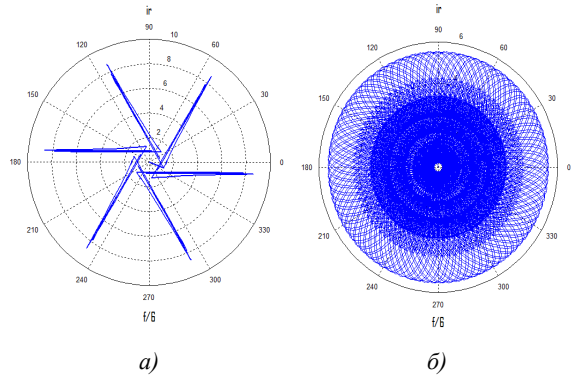
Фиг. 20. Ходографи на вектора на роторните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 3$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



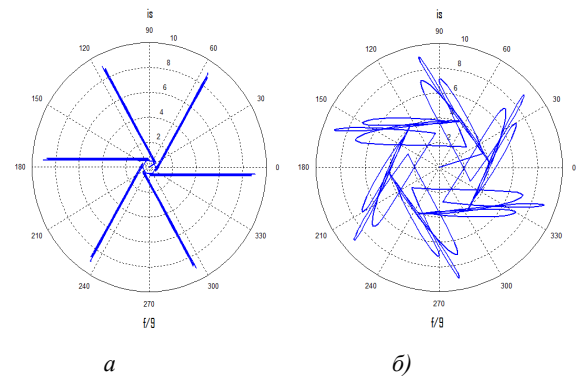
Фиг. 21. Ходографи на вектора на статорните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 6$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



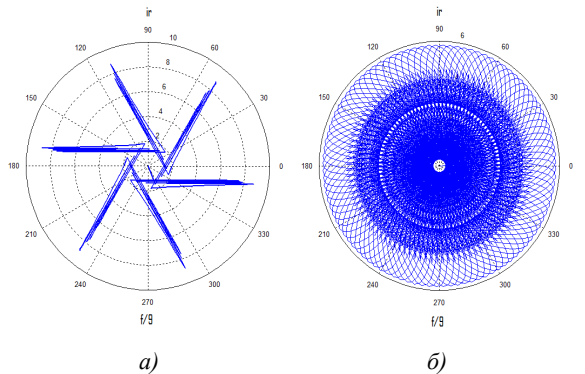
Фиг. 22. Ходографи на вектора на роторните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 6$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



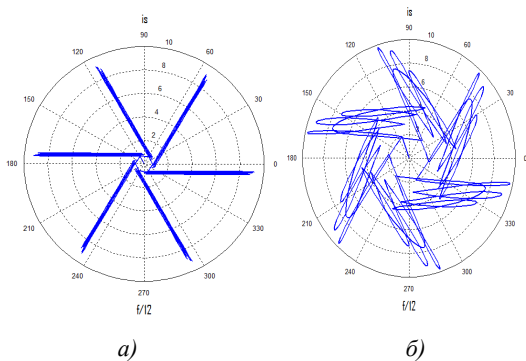
Фиг. 23. Ходографи на вектора на статорните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 9$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



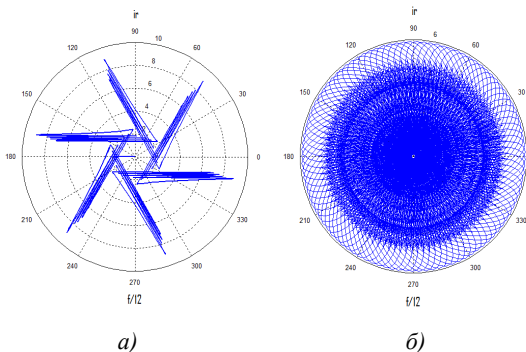
Фиг. 24. Ходографи на вектора на роторните токове в установен режим за честота $f_{mp} / 9$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



Фиг. 25. Ходографи на вектора на статорните токове в установен режим за честота $f_{\text{мр}} / 12$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване



Фиг. 26. Ходографи на вектора на роторните токове в установен режим за честота $f_{\text{мр}} / 12$

а) в режим на късо съединение б) при номинално натоварване

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Симулационните резултати на статорните токове показват, че формата им се доближава най-пълно до синтезираните форми в момента на включването на електродвигателя при $s \approx 1$. В режима на късо съединение, от формите на ходографите на статорния и роторен

изобразяващ вектор може да се заключи, че индукираните електродвижещи напрежения в намотките на асинхронната машина са породени вследствие на изменение на модула на съответния вектор, като делът на индукираните е.д.н. вследствие на пространственото движение е минимален, увеличаващ се с намаляването на работната честота. От ходографите при номинално натоварване може да се заключи, че се увеличават индукираните е.д.н. в намотките на машината, вследствие на пространственото им движение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Динов, В. Несиметрични режими и преходни процеси в електрическите машини. София, Техника, 1974, 270 с.
- [2] Ключев, В. Теория на електрозадвижването. София, Техника, 1989, 544 с.
- [3] Маринов, Е. Теория на задвижването II ч., Варна, 2005, 174 с.
- [4] Петков, Ц. Синтез и изследване на токовете на електрозадвижваща система с еднофазнотрифазен циклоконвертор. Известия на ТУ-Габрово, том 45'2013, с. 60-61.
- [5] Фираго, И., С Готовский, А. Лисс. Тиристорные циклоконверторы. Минск, Наука и техника, 1973.
- [6] Чехет, Э., В. Мордач, В. Соболев. Непосредственные преобразователи частоты для электропривода. Киев, Наукова думка, 1988 г.
- [7] Pande, S., H. Dalvi. Simulation of Cycloconverter Based Three Phase Induction Motor. International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET) 2011. ISSN: 2231-1963 July 2011
- [8] Singh, A., V. Giri. Modeling and Simulation of Single Phase Cycloconverter. International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, Issue-2, March/April, 2012, pp. 346-351.
- [9] Zhang, J., G.P. Hunter, V.S. Ramsden. A Single Phase Input Cycloconverter Driving a Three Phase Motor. The European Power Electronics Association, 1993, pp. 128-132.
- [10] Three phase induction motors. Publicity materials of ELMA AD, Troyan, Bulgaria 2000.