

МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АСИНХРОННО ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ С РЕГУЛАТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ С ШИМ

Иван Костов

Резюме: Цел на тази разработка е изследване на силови електронни преобразуватели на трифазно напрежение с високи енергийни показатели и подобрена електромагнитна съвместимост с мрежата и двигателя, притежаващи проста и надеждна система за управление и относително ниска цена. Предложен и изследван е трифазен широчинно-импулсен преобразувател на променливо напрежение, предназначен за регулиране на напрежението на статормата намотка на асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор. Използвани са методи на теорията на електрозадвижването, преобразувателната техника, физическото моделиране и симулиране. Получени са регулировъчната характеристика на преобразувателя и израз за пресмятане на коефициента на хармониците в кривата на изходното напрежение. Приведени са сравнителни резултати от физическо моделиране и симулиране на преобразувателя.

Ключови думи: широчинно-импулсен преобразувател, регулатор на напрежение, модулация, ключ за променлив ток, асинхронен двигател, електромагнитна съвместимост.

MODELING AND INVESTIGATION OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH PWM VOLTAGE CONVERTER

Ivan Kostov

Abstract: The objective of this work is to study power electronic converters of three-phase voltage with high energy performance and improved electromagnetic compatibility with network and motor, having a simple and reliable control system and relatively low price. A three-phase pulse-width converter of ac voltage to regulate the voltage of the stator winding of induction motors with squirrel-cage rotor is proposed and studied. Methods of the theory of the generalized electric machine, converter technology, physical modeling and simulation are used. The adjustable characteristic of the converter and an expression for calculating the ratio of harmonics in the output voltage curve are obtained. Comparative results of the physical modeling and simulation of the converter are shown.

Keywords: pulse-width converter, voltage regulator, pulse-width modulation, ac switch, induction motor, electromagnetic compatibility.

1. Въведение

Потреблението на електрическа енергия в света постоянно се увеличава и според Международната Агенция по Енергетика (МАЕ, IAE) през 2035 ще се увеличи с 47% в сравнение с 2012 г., като значителна част от това увеличение може да се компенсира чрез увеличаване на енергийната ефективност на промишлените предприятия, които потребяват около 42% от цялата генерирана електрическа енергия, и от която почти 70% се пада на моторите. При това в повече от 90% от електрозадвижванията няма възможност да се управлява консумацията на енергия, или това управление е неефективно [1]. Във връзка с това една от задачите за подобряване на енергийната ефективност на електрозадвижванията е да се подобри качеството на пусковите и спирачните режими на работа на трифазния асинхронен двигател - най-масовия в промишлеността. Решението на тази задача може да бъде постигнато за сметка на регулиране на напрежението на статорната намотка в зависимост от натоварването на вала с цел да се намали консумацията на активна/реактивна мощност, както и загубите в двигателя [2, 3]. Възможността за привеждането на производствените механизми в режим на повторно-кратковременни включвания води до икономия на енергия от порядъка на 30...70% и намаляване на мощността на изпълнителните двигатели [4]. В допълнение към решаването на проблема с енергоспестяването, използването на регулатори на напрежение позволява да се разширят функционалността на електрозадвижванията, да се повиши нивото на автоматизация, както и да се осигури ефективна защита на двигателя и на цялата система за управление. Целта на тази разработка е да се изследва схема за подобряване на енергийната ефективност, надеждността, електромагнитната съвместимост и цената на асинхронно електрозадвижване с регулатор на напрежение с ШИМ при максимална простота, надеждност и компактност на преобразувателя.

2. Регулатор на променливо напрежение с ШИМ

В момента съществуват много технически решения за регулиране на напрежението на статорната намотка на двигателя [5,6,7,8,9]. Един от най-перспективните е използването на непосредствени преобразуватели на променливо напрежение с широчинно-импулсна модулация на регулирането при висока модулационна честота (ШИМ РЧ). За разлика от преобразувателите на напрежение с фазово управление, ШИМ РЧ притежават висока енергийна ефективност и добра електромагнитна съвместимост с електрозахранването и двигателя, а също и позволяват намаляване на загубите в преходни режими на работа [10]. Високото качество на изходното напрежение с липса на нискочестотни хармонични компоненти, близкият до единица коефициент на мощността, широкият диапазон и високата плавност на регулирането, независимостта на изходното напрежение от промените в натоварването, възможността за двупосочен пренос на енергия са важни предимства на този клас устройства. Поради високата комутационна честота f (единици и десетки kHz) ШИМ РЧ са практически безинерционни, което има положителен ефект върху качеството на преходните процеси, както и за компенсиране на изкривяванията и колебанията на захранва-

щото напрежение [11], като по този начин се повишава стабилността и надеждността на работата на системата. Също така ШИМ РН може да изпълнява квазичестотно управление на АД (асинхронни двигатели) по различни алгоритми [10, 12]. Тъй като двигателят е индуктивен товар, то увеличението на честотата на хармоничните съставлящи на изходното напрежение на ШИМ РН води до намаляване на амплитудата на хармоничните на тока на двигателя. Но от енергийна гледна точка увеличаването на честотата f е нежелателно, тъй като това води до увеличаване на загубите от превключване в преобразувателя.

Подобряването на хармоничния състав може да се постигне чрез прилагане на алгоритъм за ШИМ със случаен закон на изменение на носещата честота. Поради разпределението на изкривяванията върху различни случайни честоти, амплитудите на висшите хармоници се намаляват съществено и ефективно се филтрират от индуктивностите на двигателя. При тези устройства спектърът на консумирания от мрежата ток е подобен на спектъра на фазното статорно напрежение. Следователно, използването на малки и относително евтини мрежови филтри може да осигури почти синусоидален входен ток на преобразувателя, т.е. и висок фактор на мощността. В ШИМ РН напрежение може да се управлява фазовия ъгъл между мрежовото напрежение и ток при използване на специални алгоритми за ШИМ.

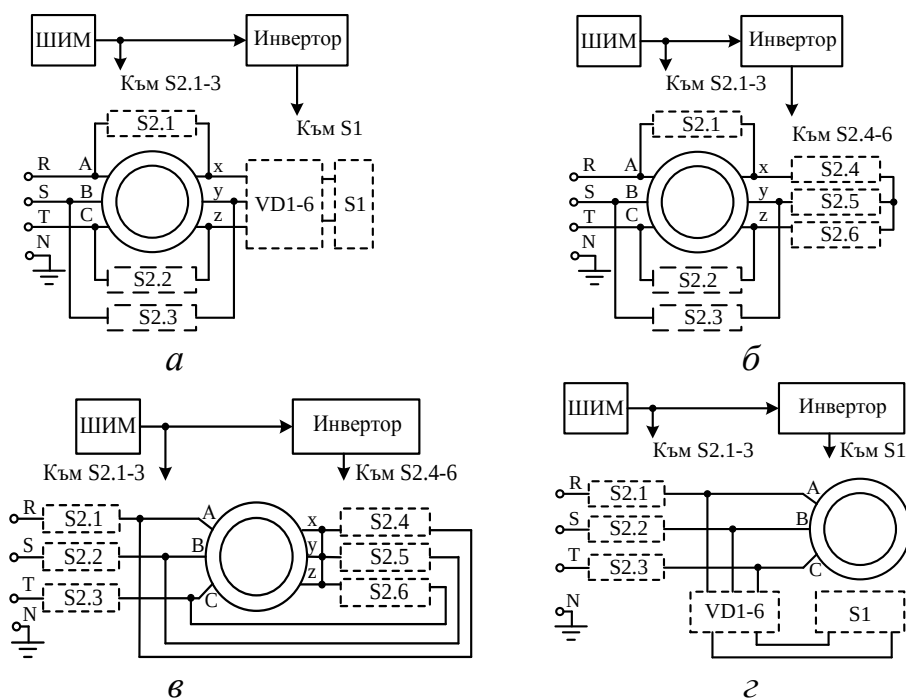
С други думи, възможно е да се регулира консумацията на реактивна мощност на мрежата и, в частност, да се поддържа максимален коефициент на мощност при различни режими на експлоатация на двигателя. Реализацията на ШИМ РН е свързана с използването на напълно управляеми двупосочни ключове въз основа на еднопосочни устройства (транзистори и диоди) по различни схеми.

Предвид различията в топологията на използваните ключове, е възможно да се изградят голям брой преобразуватели. Една възможност е използването на диодни мостове с транзисторни ключове в постояннотоковата им страна. Въпреки това разработването на схема за ШИМ РН с проста и надеждна система за управление, с високо качество на регулирането при минимален брой на управляваните елементи, и без да е необходимо да бъде синхронизиране с тока и напрежението на силовата верига остава актуална задача.

3. Описание на регулатора на напрежение

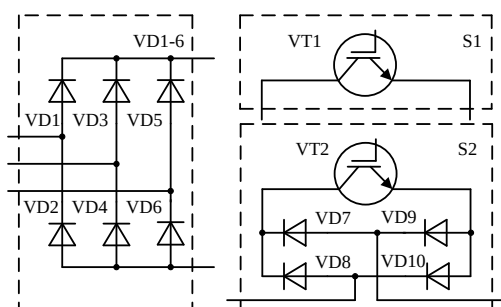
Схеми на асинхронно електрозадвижване с ШИМ РН е показана на фиг.1. Основните предположения, приети в анализа са:

- трифазното входно напрежение и намотките на двигателя са симетрични;
- активните и индуктивните съпротивления на фазите на намотките са линейни;
- насищането на магнитната система на машината се пренебрегва;
- звездният център на машината е достъпен;
- транзисторните ключове и диодите са идеални елементи.



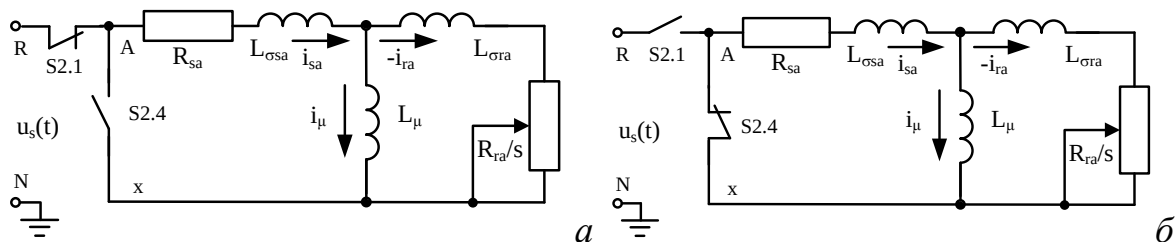
Фиг.1. Асинхронни електрозадвигвания с ШИМ РН.

Анализът на преходните процеси е направен с помощта на еквивалентна Т-образна заместваща схема за фаза на двигателя. Силовата част на преобразувателя се състои от три напълно управляеми комутатора (S2.1, S2.2, S2.3), включени паралелно (фиг.1.а,б) или последователно (фиг.1в,г) на фазите на статорната намотка и три напълно управляеми комутатора (S1 или S2.4, S2.5 и S2.6), включени в нулевата точка на статорната намотка. S1 се включва в силовата схема посредством трифазен двупътен мостов изправител VD1-6. Примерни схемни решения на диодния изправител и комутаторите са показани на фиг.2.



Фиг.2. Изправител и комутатори в ШИМ РН.

Схемата от фиг.1.в работи в два такта с общ ШИМ, показани на фиг.3.а и фиг.3.б.

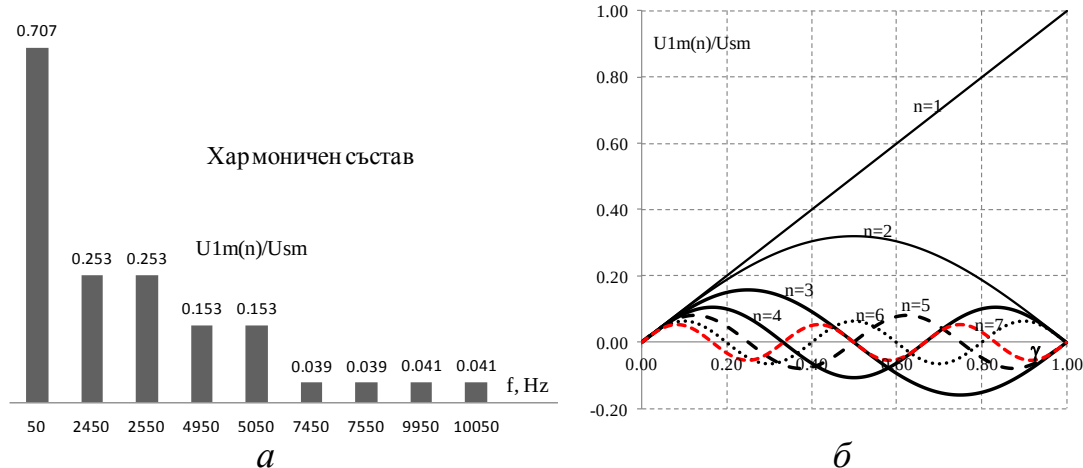


Фиг.3. Т-образна заместваща схема на фаза в ШИМ РН по време на включено състояние t_{on} (а) и по време на паузата(б).

В интервала от време t_{on} ключът S2.1 за фазата **Ax** е затворен, ключът S2.4 е отворен и двигателят работи по стандартната си схема на включване. Токът на фазата i_{sa} , равен на сумата на намагнитващия ток i_μ и на роторния ток i_{ra} нараства. Напрежението на двигателя повтаря напрежението на захранващата мрежа u_s . В интервала на паузата $T-t_{on}$ ключът S2.4 е затворен, а S2.1 е отворен, в резултат на което токовете i_{sa} , i_{ra} , i_μ продължават да протичат през намотката на фазата, намалявайки по стойност. Напрежението на двигателя е нула.

По такъв начин, като се изменя относителното време (коефициент на запълване) $\gamma = T^{-1}t_{on} = f \cdot t_{on}$ на включване на двигателя към захранващата мрежа, на изхода на преобразувателя (към двигателя) може да се формира променливо регулируемо напрежение. В изследваната схема чрез затваряне накъсо на фазите на намотката на двигателя за времето на паузата се постига непрекъснатост на протичане на тока. Запазената енергия в намотките циркулира във фазите, поддържайки работоспособността на електрозадвижването, а не се разсейва във вид на топлина в демпфиращи вериги. При това практически са изключени пренапрежения върху ключовете S за сметка на непрекъснатото протичане на тока в намотката, а загубите на енергия в преобразувателя се формират само от загубите в ключовете в отпушено състояние и динамичните загуби в ключовете при комутациите. В случая на широчинно-импулсна модулация на напрежението в спектъра се появяват хармонични съставлящи с честоти $f(n) = (n-1)f \pm f_s$, $n \in Z$, (фиг. 4а) и

амплитуди (фиг. 4б) $U_{1m(n)} = U_{sm} \gamma \frac{\sin((n-1)\pi\gamma)}{(n-1)\pi\gamma}$, където U_{sm} – амплитуда на мрежовото напрежение; $f = T^{-1}$ – честота на комутатора, f_s – честота на захранващото напрежение. Амплитудата на първата хармонична на напрежението ($n=1$) $U_{1m(1)} = U_{sm} \gamma$ т.е. нейната зависимост от коефициента на запълване е линейна, което опростява реализацията на системата за управление.

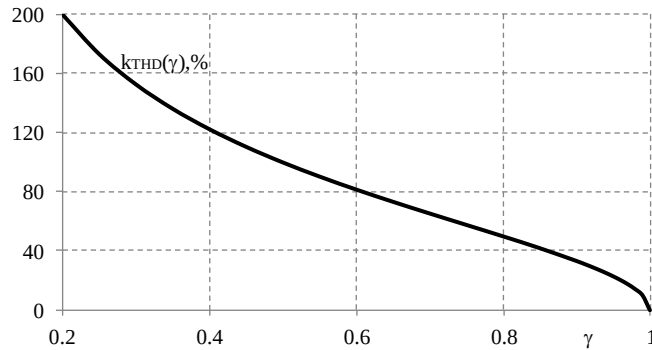


Фиг.4. Относителни амплитуди за $n=5$ при $\gamma=0.707$ (а) и стойности на първите 7 хармонични на напрежението (б) в зависимост от γ в ШИМ РН.

Коефициентът на нелинейните изкривявания на изходното напрежение зависи от коефициента на запълване

$$k_{THD}(\gamma) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_{(n)})^2}}{U_{(1)}} 100 = \sqrt{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} \cdot 100, \% .$$

Очевидно, че при такава форма на напрежението с увеличаване на коефициента на запълване k_{THD} намалява (фиг.5).

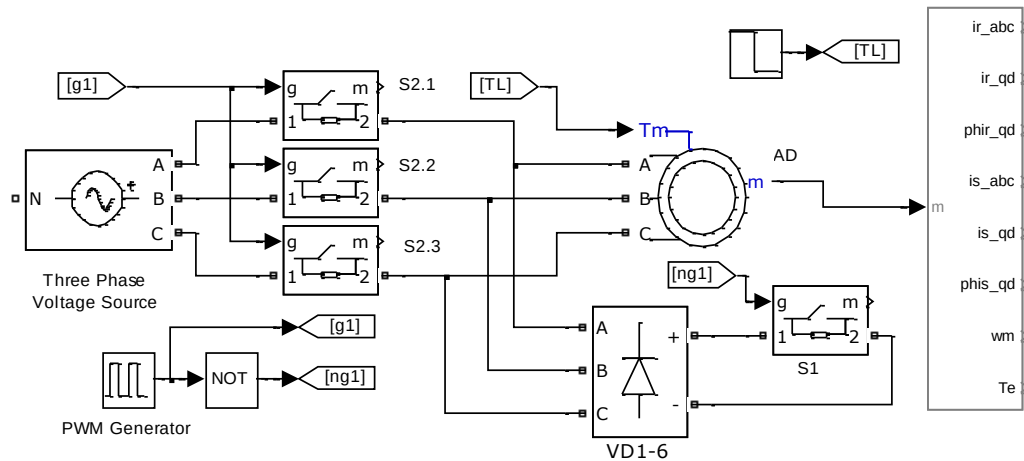


Фиг.5. Коефициент на нелинейни изкривявания в зависимост от γ .

Тъй като АД е относително инерционен обект за управление, то при честоти на комутацията единици и десетки килохерци (което е типично за разглежданите устройства) ШИМ РН може да се разглежда като безинерционно звено в системата за управление на електрозадвижването с коефициент на предаване (по първа хармонична) $K_U = U_{1m(1)} / U_{sm} = \gamma$, т.е. като регулируем в диапазона 0-100 %. В сравнение с другите известни устройства предложените преобразуватели (фиг. 1) притежават редица предимства: 1) при регулиране във веригата на изправения ток на статора (комутатор S2) може да се реализира импулсен способ на регулиране на напрежението в статорната верига на двигателя с минимално количество управляеми прибори в силовата схема [7, 12]; 2) използването на диодни мостови ключове за променлив ток за включване на статорната намотка на двигателя позволява да се намали броят на управляемите вентили в схемата и изключва необходимостта от контрол на полярността на напрежението и посоката на токовете. Освен това, изборът на диодни мостови ключове за променлив ток се обуславя още от няколко причини. една от които е отпадане на необходимостта от синхронизация на превключването на транзисторите с мрежовото напрежение или токовете и напреженията на товара [10], което би усложнило системата за управление. Но по-същественото е, че грешката в определянето на полярността на тока/напрежението води до нарушение на работата на устройството или възникването на къси съединения в силовата схема. Този проблем е особено актуален за преобразувателите, използвани при високо ниво на външните загуби или с обекти в мрежа с малка мощност, където често възникват колебания и резки изменения на напрежението [4]. Използването на модифицирани алгоритми за превключване на транзисторите без токови паузи, които могат да бъдат реализирани без синхронизация, води до влияние на изменението на натоварването върху формата на изходното напрежение. Независимо от необходимостта за въвеждане на пауза между превключванията, характеристиките на съвременните транзистори позволяват тя да бъде намалена до незначителна стойност, благодарение на което използването в предлаганата схема на

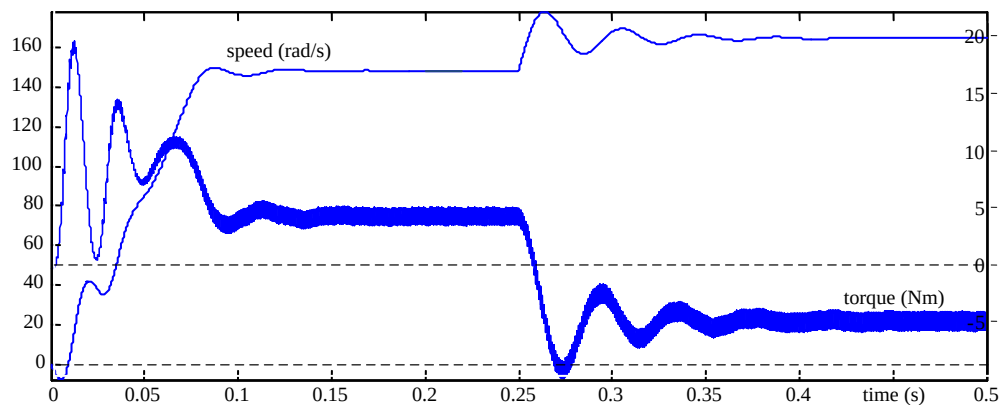
маломощна и малобааритна демпфираща верига изключва пренапрежения върху ключовите елементи при комутациите, в същото време практически не се оказва влияние върху енергийните и масогабаритните показатели на устройството.

4. Модел на електрозадвижването



Фиг.6. Модел на асинхронно електрозадвижване по схемата от фиг.1г.

Симулирането на РН с ШИМ е изпълнено в SimPowerSystems toolbox на MATLAB Simulink. В съставения модел сигналите за управление на полупроводниковите ключове с двустранна проводимост под формата на правоъгълни импулси (g1) от генератор с постоянна честота влизат директно на входа за управление на ключовете S2. Инвертираният управляващ сигнал (ng1) се подава на входа на ключа S1 след диодния мост VD1-6 (схема Ларионов). Параметрите на блока на двигателя (AD) са установени в съответствие с каталожните данни на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор - $P_N = 750 \text{ W}$, $\omega_n = 1410 \text{ min}^{-1}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $f_s = 50 \text{ Hz}$; $z_p = 2$ с параметри на заместващата схема: $R_s = 4.8 \Omega$; $L_s = 0.023 \text{ H}$; $R_r = 3.87 \Omega$; $L_r = 0.011 \text{ H}$; $L_m = 0.240 \text{ H}$; $J = 0.00284, \text{ kgm}^2$;



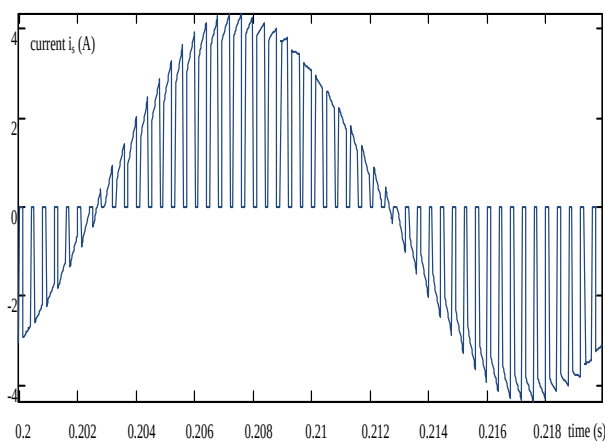
Фиг.7. Механични преходни процеси.

На фиг.7 са показани механични преходни процеси в предложеното електрозадвижване. Двигателят се включва с модулирано захранващо напрежение $U = \gamma U_N$ при натоварване $M_C = 0.5 M_N$ в съответствие със закона на Костенко $u = m^{1/2}$ за случая $f_s = \text{const.} = 50 \text{ Hz}$. В момента $t_1 = 0.25 \text{ s}$ се преминава в генераторен режим с

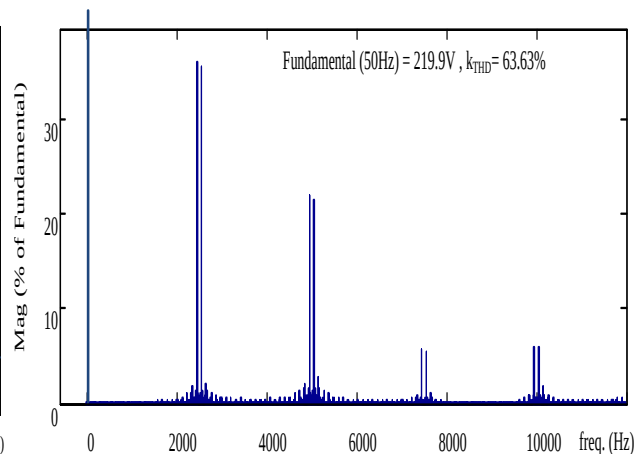
$M_C = -0.5M_N$. Получените преходни процеси са еквивалентни на процесите при синусоидално захранване с напрежение $U = 0.707U_N$.

5. Компютърно моделиране и изчислителни експерименти

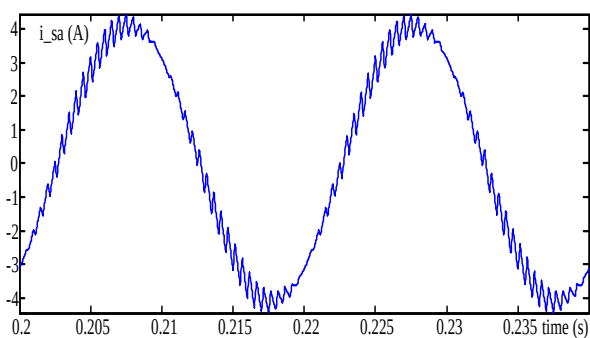
Зависимости на токовете и напреженията в преобразувателя, елементите на силовата схема и двигателя при честота на комутацията $f = 2.5\text{kHz}$ и коефициент на запълване на импулсите $\gamma = 0.707$ са показани на следващите фигури. На фиг.8 е показан установеният режим на тока на захранващата мрежа по условията на процесите от фиг.7. Аналогична е формата на захранващото напрежение непосредствено на клемите на двигателя. На фиг.9 е показан хармоничният състав на напрежението на клемите на двигателя. Определен е и коефициентът на нелинейните изкривявания $k_{THD} = 63.63\%$. Толкова е и стойността на k_{THD} на консумирания от мрежата ток. Съвсем по друг начин изглежда статорният ток на двигателя (фиг.10). В интервалите на паузата токът през фазите на намотката се поддържа от напрежението на самоиндукция при закъснени клеми на двигателя през диодния мост VD1-6. В резултат на това токът през двигателя има почти синусоидален характер с $k_{THD} = 5.05\%$ (фиг.11) .



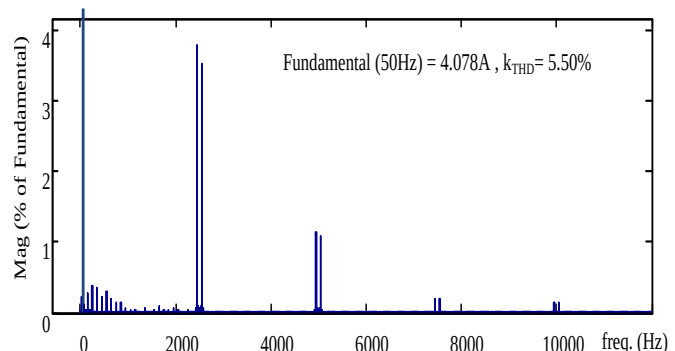
Фиг.8. Ток на захранващата мрежа.



Фиг.9. Хармоничен състав на напрежението на РН.

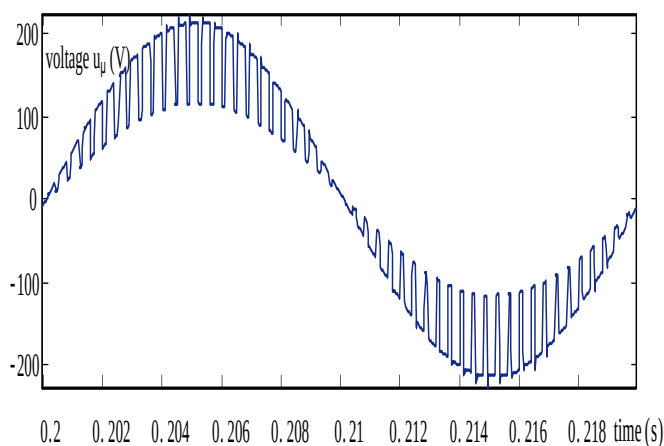


Фиг.10. Статорен ток на АД.

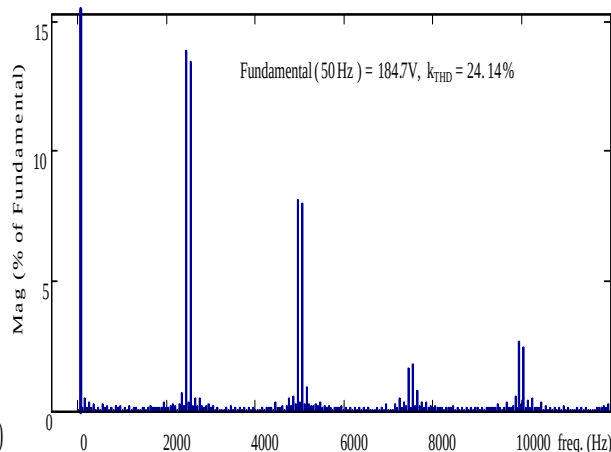


Фиг.11. Хармоничен състав на статорния ток на АД.

На фиг.12 е показано напрежението върху намагнитващия контур U_μ на фаза от заместващата схема на двигателя, а на следващата фиг.13 - хармоничният състав на същото това напрежение.

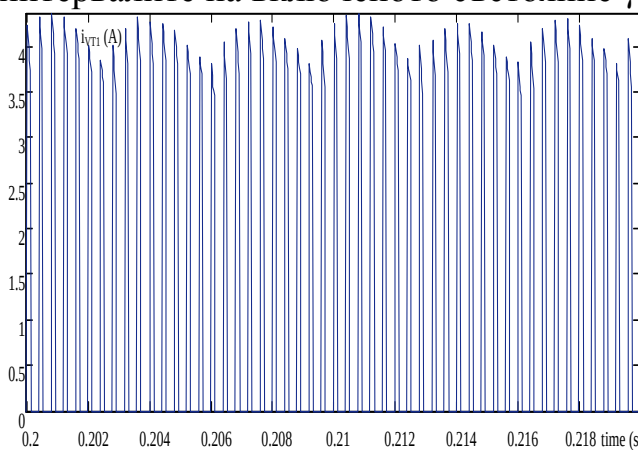


Фиг.12. Напрежение на намагнитващия контур на АД.

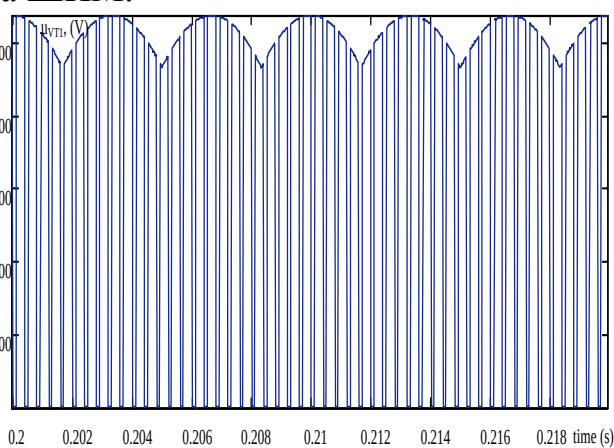


Фиг.13. Хармоничен състав на напрежението на намагнитващия контур.

На фиг.14 е показан вида на тока през закъсяващия ключ S1 по време на паузата 1-γ на ШИМ. На фиг.15 е показано напрежението върху закъсяващия ключ S1 в интервалите на включеното състояние γ на ШИМ.



Фиг.14. Ток през ключа S1.



Фиг.15. Напрежение върху ключа S1.

6. Заключение

Получените диаграми на токовете и напреженията съответстват на проведения анализ на работата на преобразувателя и при компютърното моделиране. Изчислителните експерименти показват, че преобразувателят изпълнява заложените функции със зададените показатели, а така също потвърждават правомерността на приетите при анализа допускания и правилността на създадения математически модел. Независимо че консумираният от мрежата ток не е синусоидален, високочестотните съставлящи могат лесно да бъдат филтрирани с помощта на малобабитни и относително прости мрежови филтри, което позволява да се увеличи коефициентът на мощността на устройствата и да се подобри електромагнитната съвместимост на системата „ШИМ РН – АД” със захранващата мрежа. По такъв начин, предложеният ШИМ РН може да се използва за регулирането на напрежението на асинхронния двигател, осигурявайки висока енергоефективност на двигателя и на електроздвижването. Устройството притежава високи енергийни показатели, добра електромагнитна съвместимост с мрежата и двигателя, при това не изисква сложна и скъпа система за управление.

7. Литература

- [1]. **ABB Drives and Motors for Improving Energy Efficiency**. ABB brochure, 2012.
- [2]. R. Krishnan. **Electric Motor Drives. Modeling, Analysis, and Control**, Singapore, 2003, ISBN 81-297-0319-1, pp.650.
- [3]. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. **Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства**. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.
- [4]. Цитович Л.И., Шкаликов С.И., Дудкин М.М. **Тиристорный преобразователь с интегрирующим фазосдвигающим устройством за мягкого пуска асинхронных электродвигателей**. Проблемы энергетики. – 2005. – № 7–8. – С. 57–65.
- [5]. Bose B.K. **Modern Power Electronics and AC Drives**. – Prentice Hall, 2002.
- [6]. Bose B. **Power Electronics and Motor Drives - Advances and Trends**. Academic press, 2006, pp.915.
- [7]. Браславский И.Я. **Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением**. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- [8]. Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В. **Энергосберегающие устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения**. Электротехника. – 2009. – № 12.
- [9]. Belyaev V.P. **A.C. Electric Drive With Pulse-Width Modulation Control**. Энергетика. 2014. № 1. С. 11-20.
- [10]. Vasilyev D., Firago B. **Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor**. Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements Wroclaw University of Technology: Scientific Papers № 63, Studies and Research № 29. Wroclaw, 2009. pp. 294–302.
- [11]. Rahmani L., Krim F., Khanniche M., Bouafia A. **Control for PWM AC Chopper Feeding Nonlinear Loads**. IJE, 2004, vol. 91, Iss. 3, pp. 149–163.
- [12]. El-Saady G., Sharaf A.M., Makky A., El_Sherbiny M.K., Mohamed G. **A Novel Technique for AC Supply Voltage and Frequency Modulation of Induction Motor Drives**. Industry Applications Conference. Orlando, FL, 1995. Vol. 1, pp. 530–537.
- [13]. Бернштейн А.Я., Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, Р.С. Сарбатов. **Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе**. М.: Э., 1980.
- [14]. Sadr S.M., Mashhadi H.R. **Application of PSO for Selective Harmonic Elimination in a PWM AC/AC Voltage Regulator**. 2nd ICCKE. Mashhad, 2012.
- [15]. Kostov I.J., Spirov D.S. **Power Quality Analysis In Frequency Induction Motor Drives**. Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, vol. 16, Bulgaria, Plovdiv, ISSN 1310-8271, 2011, pp. 191-195.

Автор: Иван Костов, доц. д-р, катедра „Системи за управление”, ТУ - София, Филиал Пловдив, E-mail adress: ijk@tu-plovdiv.bg.

Постъпила на 15.05.2015

Рецензент проф. д-р Михо Михов