

UOT 621.311

ENİNƏ İMPULS MODULYASIYALI ÜÇFAZALI TEZLİK ÇEVİRİCİLƏRİNİN PARAMETRLƏRİNİN YAXŞILAŞDIRILMASI ÜSULLARI

Məmmədov L.V., Məmmədova F.V.

Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası
AZ1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18

E-mail: latif.mamedov.2014@mail.ru, faxranda.mammadova@mail.ru.

Xülasə. Məqalədə sinusoidal qanunla dəyişən eninə impuls modulyasiyasının müxtəlif növlərinin formalaşdırılması zamanı üçfazlı gərginlik invertorlarının çıxış gərginliyinin spektrlərinin və keyfiyyət göstəricilərinin müqayisəsi aparılmışdır: birfazlı ikiqütblü EİM, "klassik" üçfazlı EİM, üçüncü harmonikanın modulyasiyaqabağı EİM və "vektorlu" EİM. EİM ilə invertorların çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün meyarlar təklif edilmiş, çıxış gərginliyinin ən yaxşı keyfiyyətini təmin edən EİM-ləri formalaşdırılma üsulları müəyyən edilmişdir.

Аннотация. В статье проведено сравнение спектров и показателей качества выходного напряжения трехфазных инверторов напряжения при формировании различных видов широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону: однофазной двухполярной ШИМ, «классической» трехфазной ШИМ, ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, «векторной» ШИМ. Предложены критерии оценки качества выходного напряжения инверторов с ШИМ, определены способы формирования ШИМ, обеспечивающие наилучшее качество выходного напряжения.

Abstract. The comparison of three-phase inverter's output voltage harmonic spectrum and quality when using various PWM techniques, such as "classical" three-phase PWM, PWM with third harmonic injection, space vector PWM (simplex PWM) is carried out. Performance criterions of output voltage of PWM inverters are proposed. PWM techniques, providing the best quality of output voltage, are obtained.

Açar sözlər: üçfazlı invertor, modulyasiya, elektrik intiqalı, tezlik çeviricisi, yarımkeçirici çevirici

Ключевые слова: трехфазный инвертор, модулятор, инвертор, преобразователь частоты, полупроводниковый преобразователь

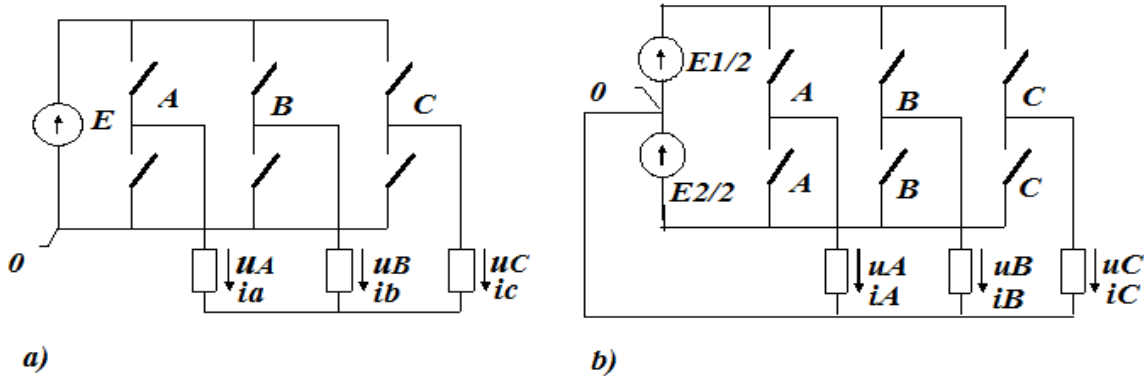
Key words: three-phase inverter, modulator, inverter, electric drive, frequency converter, semiconductor converter

Giriş. Dəyişən cərəyan elektrik intiqallarının qidalandırılmasında və sabit tezlikli dəyişən cərəyan qidalandırıcılarının zamanətli təchizat sistemlərində üçfazlı gərginlik invertorlarından geniş istifadə edilir. Invertorun çıxışında yüksək keyfiyyətli elektrik enerjisini təmin etmək üçün müxtəlif növ eninə-impuls modulyasiyaları (EİM) tətbiq edilir. Müxtəlif formalı EİM-ləri üzərində aparılmış analizin nəticələri göstərir ki, çoxlu sayda tədqiq olunmuş modulyasiyalı invertorun çıxış gərginliyi onlara müvafiq olanlarına görə seçilir.

Bu da onların nəticələrini invertorların çıxış gərginliyinin keyfiyyətini eninə-impuls modulyasiyası ilə obyektiv müqayisə etməyə imkan vermir. Bu işdə məqsəd vahid riyazi modelə əsaslanaraq eyni mülahizələr əsasında EİM-nin formalaşdırılma üsullarından düzgün istifadə edilməsindən ibarətdir.

Əsas hissə. Qeyd etmək lazımdır ki, dövlətlərarası elektrotexniki komissiya (DEK) tərəfindən impulsların eni və tezliyi, yaxud hər ikisinin çıxış parametrlərini müəyyən etmək üçün əsas tezlik müddəti daxilində modulyasiyalı idarəetmə sistemindən istifadə etmək tələbi müəyyən edilir. Əksər

ədəbiyyatlarda EİM anlayışı, bir qayda olaraq yalnız sabit keçid tezliyi ilə formalaşma üsullarına aid edilir. Üçfazlı inverterlərin iki əsas transformatorsuz sxemi məlumdur.



Şəkil 1. Üçfazlı inverterlərin transformatorsuz elektrik sxemləri

1. Üçfazlı körpü inverteri (şəkil 1, a) sıfır nöqtəsi çıxışı olmayan bir simmetrik yükü qidalandırmaq üçün istifadə olunur.

2. “Üç ədəd birfazlı yarım körpü” sxemi (şəkil 1, b) qeyri-simmetrik yük daxil olmaqla, sıfır nöqtəli çıxışı olan yükü işlətmək üçün tətbiq olunur.

İdeallaşdırılmış inverterin analizi zamanı belə hesab olunur ki, E-sabit qida gərginliyi döyüntünü ixtisar edir və ideallaşdırılmış açarlar vasitəsilə qoşulurlar. Belə bir ideallaşdırma, dövrənin ideal parametrlərinin EİM-sı tətbiq edilmiş növündən asılı olmayaraq inverterin çıxış gərginliyinin keyfiyyət göstəricilərinə təsir göstərməsi ilə əsaslandırılır.

Şəkil 1-dəki sxemlərin analizi edilməsi üçün Pspice, Matlab Simulink və digər virtual proqramların məlum paketlərindən istifadə olunur. Bununla yanaşı, periodik təkrarlanan bir neçə yüz və daha çox kommutasiya inverterlərində çevricilərdəki proseslərin hesablanması, modelləşdirmə təcrübəsinin aparılması çox vaxt tələb edir və nəticələrin ümumiləşdirilməsi üçün lazım olan nəticələrin toplanmasını çətinləşdirir. Bu işi yerinə yetirərkən spektral modelləşdirmə metodundan, yəni çevirici funksiyaların modifikasiya üsulundan istifadə edilir ki, bu da təsirin onlarla dəfə artırılmasına imkan verir [4]. Bir sıra rejimlərdə aparılan spektral modelləşmə və Pspice bazasında modelləşmənin nəticələrinin müqayisəsi ümumi nəticələrin eyniliyini göstərir.

EİM-lı çeviricinin çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin qiymətləndirilməsi meyarları.

Müxtəlif EİM növlərini müqayisə etmək üçün çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin qiymətləndirilməsinin effektiv meyarları müəyyən olunmalıdır. Çıxış gərginliyini harmonika əmsalının köməyi ilə qiymətləndirmək üçün kifayət qədər məlumat olmur, çünki bu halda alçaq və yüksək tezliklərin harmonikanın yükünə mümkün təsirləri nəzərə alınmır. Çıxış cərəyanı üçün harmonika əmsalı eyni zamanda, yükün parametrlərindən də asılıdır, belə ki, bu əmsal EİM-lı inverterin parametrləri ilə yanaşı inverter-yük sisteminin parametrləri ilə də xarakterizə olunur. Bu səbəbdən, qiymətləndirmənin daha müasir və effektiv meyarlara əsasən aparılması məsələsinin aşdırılması aktualdır.

Şəkil 1, b-dəki inverter sxemində, hər fazada müstəqil olaraq ikiqütblü, birfazlı EİM ardıcılığı formalaşır, bu zaman əsas harmoniklərin qarşılıqlı olaraq 120° sürüşməsi nəzarət sistemi tərəfindən həyata keçirilir. Şəkil 2, a-da impulsun ön hissəsinin yaxud kəsiminin modulyasiyası, şəkil 2, b-də isə ikitərəfli modulyasiya - impulsun həm ön, həm də arxa hissəsinin müəyyən kəsiminin modulyasiyası halında EİM ardıcılığının spektri göstərilmişdir. Burada k-harmonikanın nömrəsi, C_k – k-cı harmonikanın amplitudasıdır. Verilmiş nümunədə, komutasiya tezliyi $f_k = A f_{\text{çix}} = 48 f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı - çıxış gərginliyi impulsunun ən uzun müddətinin komutasiya intervalları arasındakı müddətə olan nisbəti – $K_m = 0,5$ bərabər olur. Spektrin bu xarakteri sinusoidal qanunla EİM üçün səciyyəvidir. Spektrin aşağı tezlikli hissəsi yalnız $f_{\text{çix}}$ ($k = 1$) tezlikli əsas harmonikanı

və tezliyin ətrafında yerləşən f_k komutasionalar tezliyi çoxluğundan yaranan harmonik komutasionalardan təşkil edilir. İkiqütblü EİM-da əsas harmonikanın amplitudu $1/2EK_m$ -yə bərabərdir, burada, E- qida mənbəyinin gərginliyidir.

Beləliklə, Şəkil 1, a – diaqramında bir fazanın EİM ardıcılığı başqa bir faza ilə qarşılıqlı təsir göstərir, buna görə də burada üçfazlı eninə-impuls modulyasiyasının formalaşdırılmasına baxılır, çünki çıxış gərginliyinin spektri əhəmiyyətli dərəcədə dəyişir. Şəkil 1, a sxemində çıxış gərginliyinin spektri şəkil 2, b impulsun ön yaxud kəsiminin modulyasiyası və şəkil 2, q-də ikitərəfli modulyasiyası verilmişdir. Kommunikasiya tezliyi $f_k = 48f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı $K_m = 0,5$ -ə bərabər olur. Xətt gərginliyinin spektri faza spektrində olduğu kimidir, yalnız bütün harmonikaların amplitudaları 3 dəfə böyükdür.

Birfazlı və üçfazlı EİM arasındakı fərqlərə aşağıda baxılmışdır. Əvvəlcə onu qeyd etmək lazımdır ki, üçfazlı EİM-nin spektrindəki cəbhələrin iki tərəfli modulyasiyası ilə kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonik komponentlər azalır, lakin kommutasiya tezliyinin ikinci harmonikasının sahəsindəki harmonikalar əhəmiyyətli dərəcədə artır. Bu harmonikalar, tezliyin iki dəfə yüksək olmasına baxmayaraq, daha yüksək harmonikalar üçün induktiv reaksiya verməsi səbəbindən yük cərəyanına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərə bilər. Beləliklə, yuxarıda aşkar edilmiş $k_{g,k}$ və $k_{g,2k}$ əmsalları EİM-nin müxtəlif növlərində çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin müqayisəsini həyata keçirməyə imkan verir. $A > A_{\text{son}}$ olduqda, kommutasiya tezliklərinin seçilməsindən asılı olurlar, EİM-1 və EİM-2 üçün fərqlənmirlər, sadəcə ön modulyasiya, həmçinin impulsun ön/kəsim modulyasiyası və ya ikitərəfli modulyasiya üsulu və mövcud modulyasiya əmsalından istifadə edilməklə EİM müxtəlifliyinin seçilməsi ilə müəyyən olunurlar.

Çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının amplitudunun artırılması üsulları. Yuxarıda nəzərdən keçirilən EİM növləri üçün AGÇ- avtonom gərginlik çeviricilərinin faza çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyi gərginliyinə nisbətinin ən böyük qiyməti 0,354-ə bərabərdir. Eyni zamanda, şəkil 1, a-dakı dövrəyə görə idarəolunmayan körpü düzləndiricisindən və invertordan ibarət olan transformersuz bir tezlik çeviricisində çıxış gərginliyi şəbəkə gərginliyinin 0,827 nisbətindən çox olmur. Real çeviricilərdə bu nisbət daha da aşağıdır, çünki çeviricidə gərginlik itkiləri olduğundan kommutasiya şərtlərini yerinə yetirmək zərurətindən modulyasiya əmsalı 1-ə çatmır. Buna görə də invertorun çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyinin gərginliyinə nisbətinin artırılması məsələsi çox aktualdır.

Bu məsələnin həll edilməsinin yalnız bir yolu var ki, bu da faza potensiallarının - φ_A , φ_B və φ_C impulslarının davam etmə müddətlərinin modulyasiyasının qeyri-sinusoidal qanununun istifadə olunmasıdır, hansı ki, bu modulyasiya qanununun seçilməsi əsas harmonikanın amplitudasının artmasını təmin etməlidir. Əsas harmonikada tələb olunan bu artımı təmin edən modulyasiya qanunları arasında, düzbucaqlı və trapesiya qanunlarına görə modulyasiyaları göstərmək olar. Lakin bu modulyasiyaların istifadəsi zamanı invertorun faza və xətti çıxış gərginliklərinin harmonik tərkibi pisləşir: spektrin aşağı tezlikli hissəsində, ilk növbədə çıxış tezliyinin 5, 7, 11 və 13-cü harmonikalarında tərkibi φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılıqlarından ibarət olan təhrif harmonikaları yaranır. Üçdən artıq eyni ardıcılıqlardan ibarət harmonikalar sıfırıncı harmonikanın ardıcılığı adlanır, simmetrik yüklə faza və xətti yük gərginliklərində olurlar.

Buradan əvvəlcədən modulyasiya ideyası ortaya çıxır, φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının impulslarının müddətinin modulyasiyası üçün qeyri-sinusoidal qanunun tətbiqi, hansı ki, əsas harmonikanın amplitudunun artımını təmin edəcəkdir. Bu zaman φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılığı spektrdə əsas harmonikadan başqa yalnız sıfırıncı harmonikanın ardıcılığından ibarət olacaqdır. Beləliklə, invertorun faza və xətti gərginliklərinin aşağı tezlik spektrində təhrif harmonikalarının olmaması təmin olunacaqdır. Əvvəlcədən modulyasiyanın prinsipi geniş yayılmış simmetrik yüklü üçfazlı invertorların eninə-impuls idarəetmə metodunun əsasında yaranmışdır.

Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası. Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası "vektorlu" EİM zamanı spektrdəki fərq, ilk növbədə u_{yA} , u_{yB} , u_{yC} ilə xarakterizə olunurlar ki, bunlar da gərginliklərin forma və harmonik tərkibindəki fərqlə bağlıdır.

Yuxarıdakı məlumatlardan belə nəticə çıxır ki, modulyasiya əmsalının azalması zamanı nəzarət gərginliyinin əyrisində daha yüksək harmoniklərin artması baş verir ki, nəticədə daha yüksək harmonikalar əsas harmonikanı əhəmiyyətli dərəcədə üstələyə bilər.

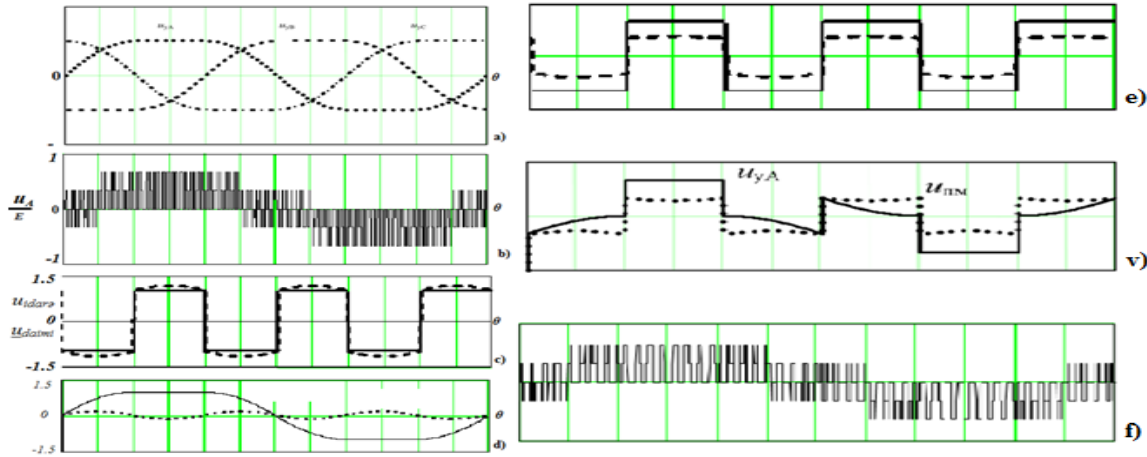
φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının EİM ardıcılığını formalaşdırarkən bu harmonikalar kommutasiya tezliyinin çoxalması və kommutasiya tezlikləri sahəsində əlavə kombinasiyalar fərqi yaradır. İdarəetmə gərginliyinin yüksək harmonikaları əsas tezliyə nisbətən daha yüksək tezliyə nail olduqlarından, əlavə kombinasiyalı harmonikaları əsas harmonikanın EİM modulyasiyasına səbəb olaraq birləşmə harmonikalarına nisbətən kommutasiya tezliyindən kənarda yerləşir və amplitudası yüksək olur. Əlavə kombinasiya harmonikalarının yaranması kommutasiya tezliyinin çoxaldığı tezliklərdə və kommutasiya tezliyinə yaxın hissədə kombinasiya harmonikalarının bölgəsinin genişlənməsinə səbəb olur.

Harmonikalar kombinasiyasının sahəsi əsas harmonikaya doğru genişləndiyindən, A-nın kiçik qiymətlərində də bu harmonikalar əsas tezliyin yaxın ətrafında olurlar. Nisbətən yüksək dərəcələrdə bu, modulyasiya əmsallarının aşağı qiymətlərində də baş verir $K_m < 0,3$. Buna görə də A_{son} qiyməti "vektorlu" EİM-lı inverterlərində yuxarıda göstərilən digər modulyasiya növlərindəkinə nisbətən daha böyük olur. "Vektorlu" EİM -də $A_{son} = 90-110$, kiçik əmsallarda isə $K_m < 0,2$, $A_{son} = 150-200$ olur. $A < A_{son}$ şərti seçildiyi zaman, spektrin aşağı tezlikli hissəsində təhrif harmonikaları nəzərə çarpan dərəcədə vardır. Yalnız kommutasiya tezliyinin yüksək seçildiyi halda, $f_k = A_{son}f_{cix}$, harmonika əmsallarının k_k və $k_{r,2k}$ keçid tezliyindən asılı olmadığı müşahidə olunur və əsas harmonikanın sahəsi kifayət qədər böyük harmonika kombinasiyalarının mövcudluğundan azad olur. "Vektorlu" EİM tətbiq edərkən ön (kəsim) və iki tərəfli modulyasiya arasındakı fərq əhəmiyyətli dərəcədə düzəldilir. Modulyasiya əmsalının azaldılması ilə iki tərəfli modulyasiyalı EİM-də kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonikaların azalması müşahidə edilmir. Bu, sıfırıncı ardıcılığın komponentlərinin φ_A , φ_B və φ_C potensiallarının spektrlərindəki kiçik rolu ilə əlaqədardır. Nəticədə $k_{r,k}$ və $k_{r,2k}$ əmsalları arasındakı ədədi fərq az olur.

"Vektorlu" EİM və üçüncü harmonikanın ilkin modulyasiyası ilə EİM-nin harmonik əmsallarının ən yaxşı göstəricilərini müqayisə edək. Bunun üçün iki modulyasiyanın həyata keçirildiyi zaman qeyd olunan EİM növləri üçün harmonika əmsallarının $k_{r,2k}$ nisbətini tapırıq. Təqdim olunan məlumatlar göstərir ki, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı olan EİM, "vektorlu" EİM ilə müqayisədə çıxış gərginliyinin daha yaxşı harmonik tərkibini təmin edir və bu üstünlük modulyasiya əmsalının azalması ilə artır. Ancaq bu nəticə tamamilə belə deyil. "Vektorlu" EİM icra edildiyi zaman çıxış tezliyinin 1/3 periodu ərzində fazaların hər biri passiv olur və passiv fazada heç bir kommutasiya həyata keçirilmir. Ona görə də vektorlu EİM zamanı güc açarlarının orta kommutasiya tezlikləri EİM-nin digər növlərindəki çıxış tezliklərinin eyni saydakı impulslarının tezlikləri ilə müqayisədə 1,5 dəfə kiçik olur. Əgər "vektorlu" EİM istifadə edilən zaman A parametrini 1,5 dəfə artırırsa, onda inverterdəki kommutasiya itkiləri, əvvəlki kommutasiya tezlikləri ilə EİM-nin digər növlərindəki inverterlə eyni olacaq, cərəyanın harmonika əmsalı isə yüksək harmonikaların tərkib hissələri üçün yükün induktiv reaksiyası zamanı 1,5 dəfə azalacaq. Cihazların orta kommutasiya tezliyinin qorunması halında, gerçək yarımkeçirici cihazlarda keçid proseslərinin inverterin çıxış gərginliyinin harmonik tərkibinə təsiri dəyişməyəcəkdir [3].

Lakin bu mülahizələrdə bir çatışmamazlıq var. Güc açarlarında aktual kommutasiya prosesləri modulyasiya əmsalının minimum və maksimum dəyərini məhdudlaşdırır. Məhdudiyyət inverterin çıxış gərginliyində minimum icazə verilən impuls müddəti ilə əlaqələndirilir və tətbiq olunan güc açarlarının xüsusiyyətlərindən asılıdır. Kommutasiya tezliyinin artması bu minimum icazə verilən müddəti dəyişmir, ona görə də əgər ilkin kommutasiya tezliyində modulyasiya əmsalının maksimum dəyəri 0,9 olarsa, o zaman keçid tezliyinin 1,5 dəfə artması ilə maksimum modulyasiya əmsalı 0,85-ə qədər azalacaq. Eyni zamanda, çıxış gərginliyinin əsas harmonikinın maksimum amplitudunun qida gərginliyi E-yə nisbəti 6% azalır və buna görə keçid tezliyinin artması əsassız ola bilər.

Beləliklə, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı EİM və "vektorlu" EİM arasındakı seçim birmənalı deyil və konvertorun parametrləri və "enerji mənbəyi - çevirici - yük" sisteminin ətraflı müqayisəsini tələb edir ki, onun üçün bu araşdırmada göstərilən nəticələrdən istifadə edə bilər.



Şəkil 2. EİM-nin müxtəlif üsullara görə çıxış signallarının formaları

Nəticə.

1. Eninə-impuls modulyasiyalı invertorun çıxış gərginliyinin keyfiyyətini qiymətləndirmək üçün kommutasiya tezliyinin ikiqat artırılması və kommutasiya tezliklərinin yaxın yerləşdirilməsi, spektrlərin kombinasiyalı tərkiblərini nəzərə alan harmonik əmsallarından istifadə etmək təklif olunur;
2. İnvertorun çıxış cərəyanının məlum yük parametrlərində göstərilən harmonik əmsalları yüksək dəqiqliklə hesablamağa imkan verir;
3. EİM-nin formalaşdırılması zamanı çıxış gərginliyinin spektrində əsas harmonikanın amplitud artımı ilə proseslərin bir ortaqlığı müəyyən edilmişdir;
4. EİM "vektorlu" və üçüncü harmonikanın modulyasiyadan əvvəlki EİM-sı ilə reallaşdırılmasında ardıcıl sıfırıncı harmonikalı signalların idarəedici modulyasiyaqabağı prinsipindən istifadə olunur, modulyasiyaqabağı signalların yalnız formaları fərqlənilir.

Ədəbiyyat

1. Чаплыгин, Е.Е. Влияние снабдеров на работу автономных инверторов с ШИМ / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин //Электричество, -2003. № 1.
2. Чаплыгин, Е.Е. Спектральные модели автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Е.Е. Чаплыгин, Д.В. Малышев// Электричество, -1999. №8.
3. Сандлер А.С. Тиристорные инверторы с широтноимпульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями/ А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий, –М.: Энергия,-1968.-98 с.
4. Чаплыгин, Е.Е. Спектральные модели импульсных преобразователей с переменной частотой коммутации / Е.Е. Чаплыгин, Нгуен Хоанг Ан //Электричество, -2006. № 4.
5. Изосимов, Д.Б. Симплексные алгоритмы управления трёхфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ / Д.Б. Изосимов, С.Е. Рывкин, С.В. Шевцов Электротехника, - 1993. №12.
6. Коровин, В.В. Модуляционные методы построения импульсных преобразователей/ В.В. Коровин, С.Г. Обухов// Практическая силовая электроника, – 2005. №19, - с.38-43.

Məqalə qəbul olunub: 20.03.2020

Təvsiyə edib: t.e.d., prof. A.M.Qafarov