

МЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ С ЕДНОФАЗНО ТРИФАЗЕН КВАЗИРЕЗОНАНСЕН ЦИКЛОКОНВЕРТОР**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRO DRIVE SYSTEM WITH SINGLE PHASE QUASYRESONANCE CYCLOCONVERTER****Цветозар Петков***
ТУ-Габрово

Статията е постъпила на 16 септември 2014г.; приета за отпечатване на 26 септември 2014г.

Abstract

The paper shows the result of analyze and study of mechanical characteristics of electro drive system based on direct frequency converter and induction motor. The analyze is done on theory of T – equivalent scheme by reading of higher harmonics action upon mechanical property of the drive system. Questions about nonsinusoidal power supply properties of induction motor are considering also.

Keywords: циклоконвертор, механични характеристики, висши хармоници, T-образна заместваща схема.**ВЪВЕДЕНИЕ**

Теоретичния анализ на свойства на електрозадвижващите системи е от фундаментално значение в инженерните изследвания и разработки, независимо от типа електромеханичен преобразувател и вида на управление. При електрозадвижващите системи, базирани на асинхронен електродвигател, удобна за анализ и изследване е теорията на заместващите схеми, даващи възможност за изследване на електрозадвижването по време на установените режими на работа. Управлението на асинхронния електродвигател посредством полупроводникови преобразуватели определя работа с несинусоидални напрежения, респ. токове. Формите на изходните напрежения и протичащите токове се определят от различни фактори, като принцип на действие на преобразувателя, вид на модулация, ъгъл на фазово управление и др. Анализа на електромагнитните процеси при несинусоидално захранване има своите особености, свързани със свойствата на машината и влиянието на несинусоидалността върху енергетичните и механични показатели на електрозадвижването [1,2].

В статията са представени резултатите от анализа и изследването на механичните характеристики на електрозадвижваща система базирана на еднофазно трифазен квазирезонансен циклоконвертор и асинхронен електродвигател с накъсосъединен ротор.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Еквивалентното действие на протичащите токове в намотките на асинхронната машина реализира резултантното магнитно поле, чието пространствено изменение в общия случай не се извършва по синусоидален закон. Появата на хармонични в магнитното поле на машината се определя от няколко фактора:

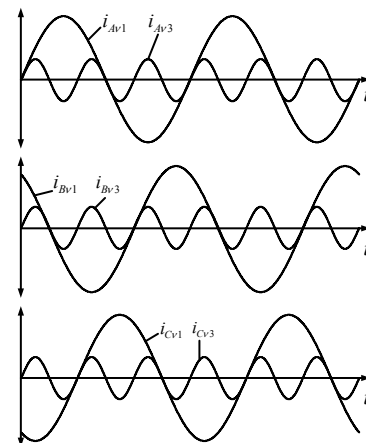
- несинусоидалност на протичащите токове в намотките на машината;
- несинусоидално разпределение в пространството на намотката по дължината на полюсното деление на машината;
- наличието на зъби и канали намиращи се от двете страни на въздушната междина;

- насищането на магнитната верига.

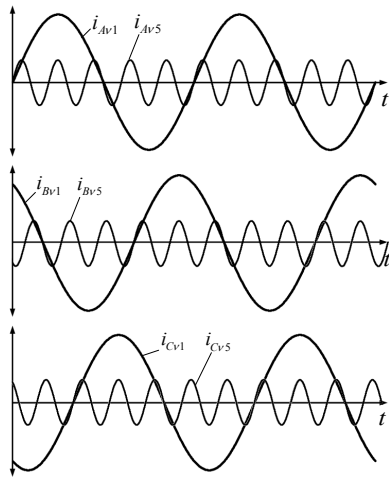
Отчитането на всички фактори значително усложнява анализа на електромагнитните процеси при преобразуването на енергията, затова обикновено се отчита единствено първият фактор, а влиянието на останалите се пренебрегва [1, 2].

В трифазната машина магнитовъзбудителните напрежения на отделните хармонични създават еквивалентни полета, въртящи се в различни посоки и скорости, определени от номера на съответните хармоници. Изключение правят трети и кратните на него, създаващи пулсиращи магнитни полета неучастващи в образуването на въртящия момент на машината [1]. Пространствените хармонични на електромагнитното поле, реализирани от отделните хармонични на протичащите фазни токове, се разделят на прави и обратни хармонични, в зависимост от посоката на движението им спрямо посоката на основния хармоник.

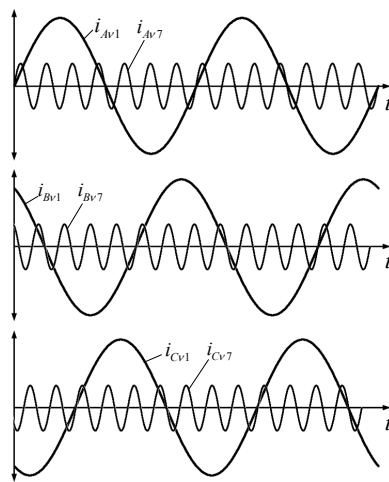
На следващите фигури са изобразени третите, петите и седмите хармонични, както и основния хармоник на фазните токове протичащи през трите намотки на машината.



Фиг. 1. Основен и трети хармоници на трифазна система токове



Фиг. 2. Основен и пети хармоници на трифазна система токове



Фиг. 3. Основен и седми хармоници на трифазна система токове

Както се вижда от фиг. 1 за трети хармоник, максимумите на съставящите съвпадат по фаза, което означава, че резултантното магнитно поле създадено от тях и полетата на кратните на три хармоници са неподвижни и пулсират в пространството:

$$v_i = 3k \tag{1}$$

Където: i - индекс на хармоника съвпадащ с номера му - $k = 1, 3, 5, 7, \dots$

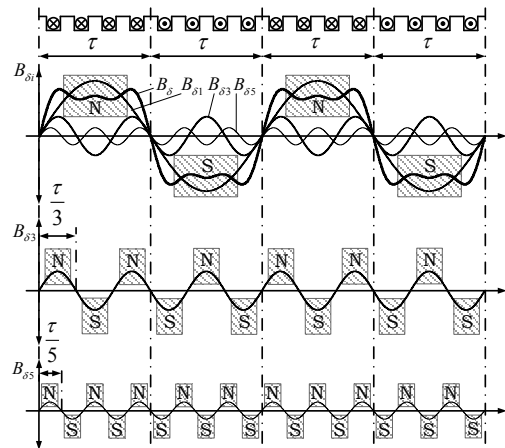
В зависимост от последователността на редуване на максимумите на отделните хармонични съставящи на трите фазни тока, се определя посоката на въртене на резултантното поле създадено от хармониците с еднакъв номер. Както е видно от фиг. 2, максимумите на петите хармонични не се редуват със същата последователност както максимумите на основния хармоник, докато максимумите на седмите хармоници (фиг. 3) са в същата последователност. Това означава, че резултантното поле създадено от петите хармоници се върти в противоположна посока на полето създадено от основния хармоник и е обратен хармоник, а полето от седмите съвпада по посока, и се определя като прав хармоник. Номерата на правите и обратните хармонични се определя по:

$$v_i = 6k \pm 1 \tag{2}$$

Където: $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ за правите хармоници, $k = 1, 2, 3, \dots$ за обратните хармоници;

Знакът „плюс“ се отнася за хармониците въртящи се съпосочно с полето т.е за правите съставящи, а „минус“ за обратните.

От съществено значение за анализа на електромагнитните процеси в асинхронната машина е определянето на скоростта на въртене на отделните пространствени хармонични на полето. Основен метод за изследването в този случай, се явява метода при който намотките на машината се разглеждат в разгънато състояние, а пространствените съставящи се явяват електромагнитни вълни, движещи се с различна линейна скорост. На фиг. 4 е показан напречен разрез на разгънатата намотка с две двойки полюса ($p = 2$), както и приблизителната крива на разпределение на радиалната съставка на магнитната индукция във въздушната междина. Показани са също така пространствените разпределения на основния, трети и пети хармоници.



Фиг. 4. Намотка с две двойки полюса представена в разгънат вид и радиалните съставки на разпределението на магнитната индукция на хармоничните съставящи

Пространствения период T_n на изменение на B_δ е равен на двойното полюсно деление $T_n = 2\tau$, което се нанася p пъти по дължината на намотката, като основния хармоник $B_{\delta 1}$ има същия пространствен период на разпределение. В електромагнитно отношение това означава, че дъгата от окръжността на която отговаря дължината на двойното полюсно деление 2τ всъщност отговаря на 360° градуса ъгъл на завъртане на вектора, изобразяващ $B_{\delta 1}$, наричати се още електрически градуси[1]. Ако $p = 1$, то следва:

$$\alpha_{e_1} = \alpha_1 \tag{3}$$

Където: α_1 - геометричен ъгъл на завъртане на полето от основния хармоник, α_{e_1} - ъгъл на завъртане на изобразяващия вектор на основния хармоник;

При многополюсните машини за цялата дължина на окръжността, електрическият ъгъл се нанася p пъти, както е показано на фиг. 4 или за произволен

Ъгъл α между две точки от окръжността на намотката е в сила зависимостта:

$$\alpha_{e_1} = p\alpha_1 \quad (4)$$

За всяка хармонична съответните електрически $\alpha_{e_{v_i}}$ и пространствен α_{v_i} ъгли са в следната зависимост:

$$\alpha_{e_{v_i}} = v_i p \alpha_{v_i} \quad (5)$$

За една и съща стойност на електрическите ъгли на основния хармоник и на всяка една от съставляващите се прилага равенството:

$$p\alpha_{v_1} = v_i p \alpha_{v_i} \quad (6)$$

или

$$\alpha_{v_i} = \frac{\alpha_{v_1}}{v_i} \quad (7)$$

При диференциране спрямо времето се получава зависимостта между скоростта на въртенето на полетата от висшите хармоници ω_{v_i} и от основния ω_{v_1} :

$$\omega_{v_i} = \frac{\omega_{v_1}}{v_i} \quad (8)$$

Следователно скоростта на полетата създадени от висшите хармонични зависи обратно пропорционално от номера им. В асинхронната машина електромагнитните полета създадени от хармониците на статора и хармониците на полетата създадени от ротора с един и същ номер се въртят неподвижно едни спрямо други за всички стойности на хлъзгането. Тези полета се сумират и образуват резултантни магнитни потоци за отделните хармонични Φ_{v_i} . При взаимодействието на тези хармонични на потока и хармоничните с един и същ номер на роторния ток I_{2v_i} се образува електромагнитен момент, по същия начин както се образува и от основния хармоник. Поради начина по който възникват тези моменти те се наричат асинхронни. Ако асинхронния електродвигател работи в двигателен режим, ротора се върти в същата посока с правите хармоници, ако скоростта на ротора е по-ниска от скоростта на определен хармоник то момента от този хармоник действа в същата посока, както този обусловен от основния. При увеличаване на скоростта над тази на съответния хармоник на потока, електродвигателя работи в генераторен режим по отношение на него т.е съответния асинхронен момент е спиращен. Хлъзгането на ротора спрямо полетата създадени от висшите хармоници се определя по:

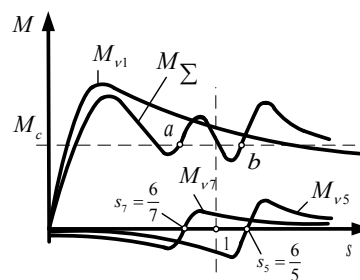
$$s_{v_i} = \frac{\pm \frac{\omega_{v_1}}{v_i} - \omega_r}{\pm \frac{\omega_{v_1}}{v_i}} \quad (9)$$

Където: s_{v_i} - хлъзгане на ротора спрямо v_i -тия хармоник, ω_r - ъглова скорост на ротора;

Знаците „+“ и „-“ се отнасят за правите и съответно за обратните хармоници. След математически преобразувания и отчитането, че $\omega_r = \omega_1(1-s_1)$, хлъзгането спрямо полетата на хармоничните се представя така:

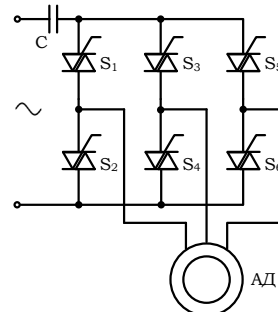
$$s_{v_i} = 1 \mp v_i(1-s_{v_1}) \quad (10)$$

Механичната характеристика на асинхронния електродвигател се определя от сумарния еквивалентен момент на всички хармоници, като по-силно изразени са тези на основния, на пети и седми хармоници. Когато ротора се движи синхронно с полето на определен хармоник момента развиван от него е нула. За тези стойности на хлъзгането в механичната характеристика възникват т.нар. „провали“, като в някои случаи в зависимост от отношението на съпротивителния към сумарния електромагнитен момент, е възможна устойчива работа в участъците на провалите, най-силно изразени в участъците около точката $s_{v_1} = 0$ т.е при пускане в двигателен режим или при работа с противовключване фиг. 5.



Фиг. 5. Асинхронни моменти от 1-ви, 5-и и 7-и хармоници на магнитното поле и резултатен електромагнитен момент

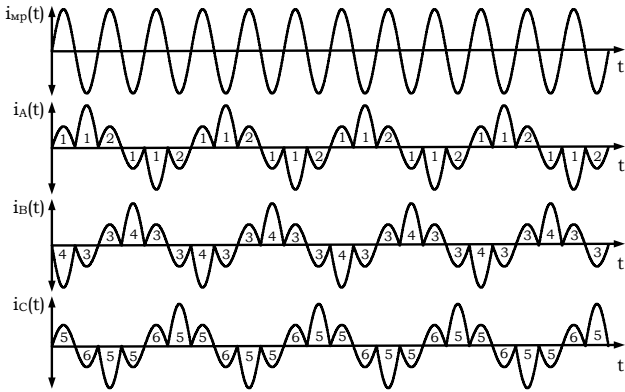
Изследваната електрозадвижваща система е базирана на еднофазно трифазен циклоконвертор с включен кондензатор в първичната верига и асинхронен електродвигател показани на фиг. 6.



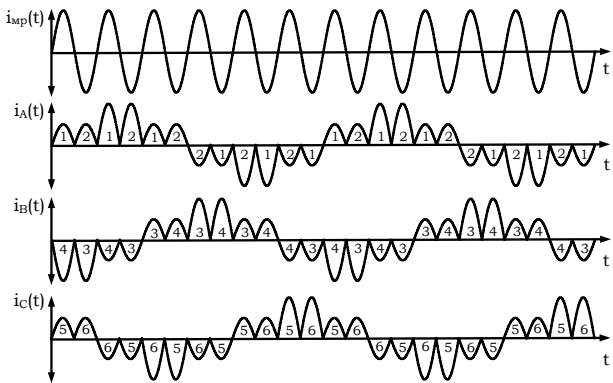
Фиг. 6. Електрозадвижваща система с еднофазно трифазен квазирезонансен циклоконвертор

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 управляващите импулси.

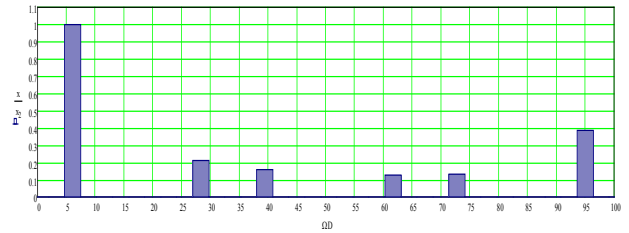


Фиг. 7. Форми на токовете за честота $f_{MP}/3$



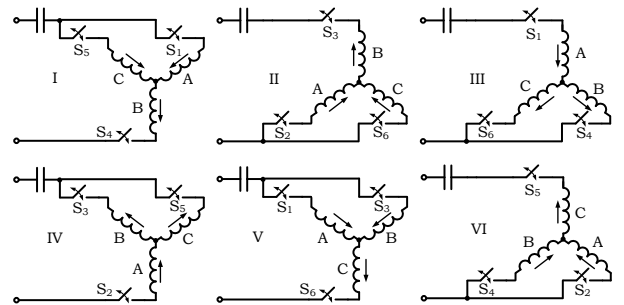
Фиг. 8. Форми на токовете за честота $f_{MP}/6$

Както е видно от фиг. 7 и 8, 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 [2,4]. Стойността на капацитета определя резонансен режим за стойност на хлъзгането $s = 1$, за останалите стойности, режима е квазирезонансен. Хармоничния анализ на фазните токове за различните работни честоти, са показани на фиг. 9. Изследванията са разработени с помощта на софтуерния продукт MathCAD [3].



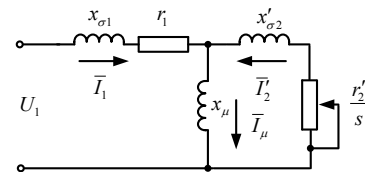
Фиг. 9. Хармоничен анализ съответно за честоти $f_{MP}/3, f_{MP}/6$ и $f_{MP}/9$

Анализа на механичните свойства на системата се извършва на базата на Т-образната заместваща схема. Както е видно от принципа на действие, за всеки поупериод на тока от захранващата мрежа циклоконвертора свързва намотките на асинхронния електродвигател в определена последователност, като винаги една от намотките е включена последователно на другите две, присъединени в паралел, по начина показан на фиг.10.



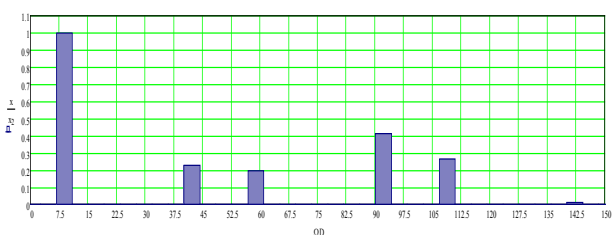
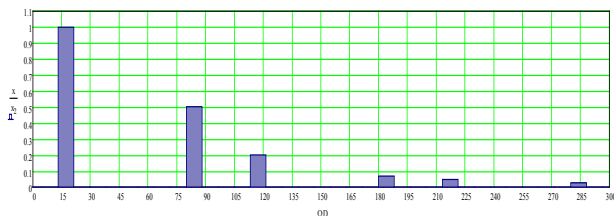
Фиг. 10. Възможни присъединения на статорните намотки на асинхронния електродвигател

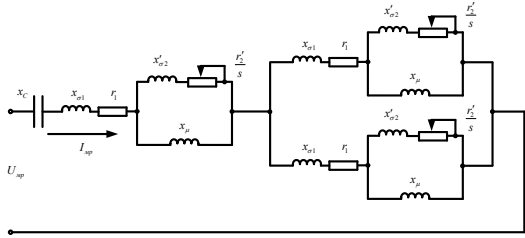
Вида на Т-образната заместваща схема на асинхронната машина и еквивалентната заместваща схема съгласно такова управление на електрозадвижващата система, са показани на фиг. 11 и 12.



Фиг. 11. Т-образна заместваща схема на асинхронна машина

Където: U_1 и I_1 - напрежение и ток за фаза на АД, I_{μ} - намагнитващ ток, \bar{I}_2 - приведен роторен ток, r_1 и $x_{\sigma 1}$ - активно и индуктивно съпротивление на разсейване за фаза на статора, r'_2 и $x'_{\sigma 2}, x'_2$ - приведени активно и индуктивно съпротивление на разсейване за фаза на ротора, x_{μ} - взаимоиндуктивно съпротивление, $s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0}$ - хлъзгане, $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ и ω_r - ъглова скорост на магнитното поле и на ротора, f и p - честота на захранващото напрежение и брой двойки полюси.





Фиг. 12. Еквивалентна заместваща схема на електрозадвижващата система за всеки полупериод на тока от захранващата мрежа

Определя се еквивалентното комплексно съпротивление на Т-образната заместваща схема:

$$Z_{\phi} = \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx_{2\sigma}\right)jx_{\mu}}{\frac{r'_2}{s} + j(x_{2\sigma} + x_{\mu})} + r_1 + jx_{\sigma 1} \quad (11)$$

След което се намира еквивалентното комплексно съпротивление на електрозадвижващата система съгласно фиг.12:

$$Z_{екв} = Z_{\phi} + \frac{Z_{\phi}^2}{2Z_{\phi}} - jx_C = \frac{3}{2}Z_{\phi} - jx_C \quad (12)$$

Комплексната стойност на тока от захранващата мрежа $\bar{I}_{мп}$ се определя от:

$$\bar{I}_{мп} = \frac{U_{мп}}{Z_{екв}} \quad (13)$$

Управлението на асинхронния електродвигател по показания начин определя стойност на тока за фаза равна на половината от максималната стойност на тока за мрежата[5]:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{mod}(\bar{I}_{мп}) \quad (14)$$

Израз за развиваната електромагнитна мощност и момент, налага определянето на приведения роторен ток. За тази цел се записва системата уравненията за електрическото равновесие в контурите на Т-образната заместваща схема:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = I_1(r_1 + jx_{\sigma 1}) + j\bar{I}_{\mu}x_{\mu} \\ 0 = \bar{I}'_2\left(\frac{r'_2}{s} + jx_{\sigma 2}\right) + j\bar{I}_{\mu}x_{\mu} \\ \bar{I}_{\mu} = I_1 + \bar{I}'_2 \end{cases} \quad (15)$$

От второ уравнение се определя израз за \bar{I}'_2 , а от първо израз за \bar{I}_{μ} :

$$\bar{I}'_2 = -\frac{j\bar{I}_{\mu}x_{\mu}}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx_{\sigma 2}\right)} \quad (16)$$

$$\bar{I}_{\mu} = \frac{\bar{U}_1 - I_1(r_1 + jx_{\sigma 1})}{jx_{\mu}} \quad (17)$$

След заместване на (17) в (16), се получава израз за приведения роторен ток в неявна форма на комплексното число:

$$\bar{I}'_2 = -\frac{[\bar{U}_1 - I_1(r_1 + jx_{\sigma 1})]s}{r'_2 + jsx_{\sigma 2}} \quad (18)$$

Като се отчете, че $\bar{U}_1 = I_1Z_{\phi}$ и след рационализиране за приведения роторен ток се получава:

$$\bar{I}'_2 = -\frac{(x_{\sigma 2} + x_{\mu})I_1x_{\mu}s^2}{r'_2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2s^2} - j\frac{I_1x_{\mu}r'_2s}{r'_2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2s^2} \quad (19)$$

Съответно рационализиран израз за модула:

$$\text{mod}(\bar{I}'_2) = \frac{I_1x_{\mu}s}{\sqrt{r'_2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2s^2}} \quad (20)$$

Развиваната електромагнитна мощност на електродвигателя е:

$$P_e = m \frac{I_1^2 x_{\mu}^2 r'_2 s}{r'_2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2 s^2} \quad (21)$$

Където;

m - брой фази на електродвигателя

След което се определя развивания електромагнитен момент:

$$M_e = m \frac{I_1^2 x_{\mu}^2 r'_2 s}{\omega_0 [r'_2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2 s^2]} \quad (22)$$

Относно висшите хармоници и отчитането им върху механичните свойства на електрозадвижването се задават синхронните скорости на отделните хармонични:

$$\omega_{0v_i} = \pm \frac{\omega_{0v1}}{v_i} \quad (23)$$

За индуктивните съпротивления за отделните хармонични е необходимо се отчита:

$$\begin{cases} x_{\sigma 1v_i} = \frac{\omega}{nv_i} L_{\sigma 1} \\ x_{\sigma 2v_i} = \frac{\omega}{nv_i} L_{\sigma 2} \\ x_{\mu v_i} = \frac{\omega}{nv_i} L_{\mu} \end{cases} \quad (24)$$

Където: $n = 3, 6, 9 \dots$ - коефициент на делене на цикло-конвертора;

Ефективните стойности на токовете на отделните хармонични се определят с помощта на коефициентите на връзката, получени от отношението на ефективната стойност на тока за фаза и хармоника с определен номер:

$$I_{1v_i} = k_{v_i} I_1 \quad (25)$$

От където изрази (21) и (22) добиват следния вид за отделните хармонични съставящи:

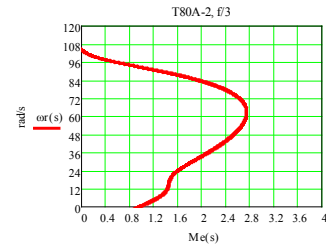
$$P_{v_i} = m \frac{I_{1v_i}^2 x_{\mu}^2 r_2' s_{v_i}}{v_i^2 r_2'^2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2 s_{v_i}^2} \quad (26)$$

$$M_{v_i} = m v_i \frac{I_{1v_i}^2 x_{\mu}^2 r_2' s_{v_i}}{\omega_{0v1} [v_i^2 r_2'^2 + (x_{\sigma 2} + x_{\mu})^2 s_{v_i}^2]} \quad (27)$$

Еквивалентния въртящ момент се определят от сумарното действие на моментите от хармоничните:

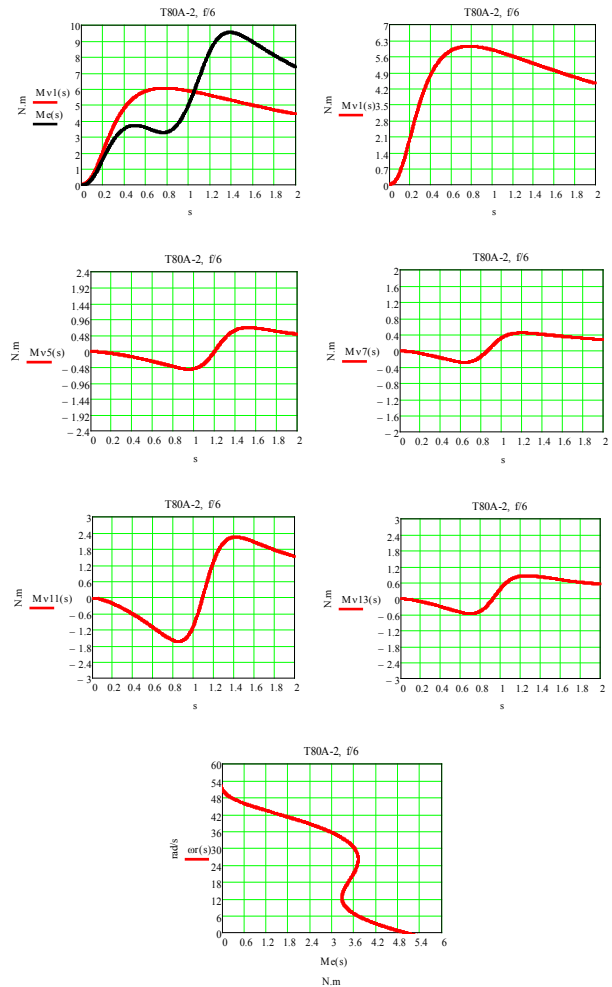
$$M_{екв.} = M_{v_1} + M_{v_5} + M_{v_7} + M_{v_{11}} + \dots + M_{v_i} \quad (28)$$

На следващите фигури са показани характеристики за еквивалентния момент, както и характеристиките определени от първи, пети и седми хармоници за асинхронен електродвигател тип Т80А-2, за честота $f_{MP}/3$ и работен капацитет определящ резонансен режим за $s = 1$.



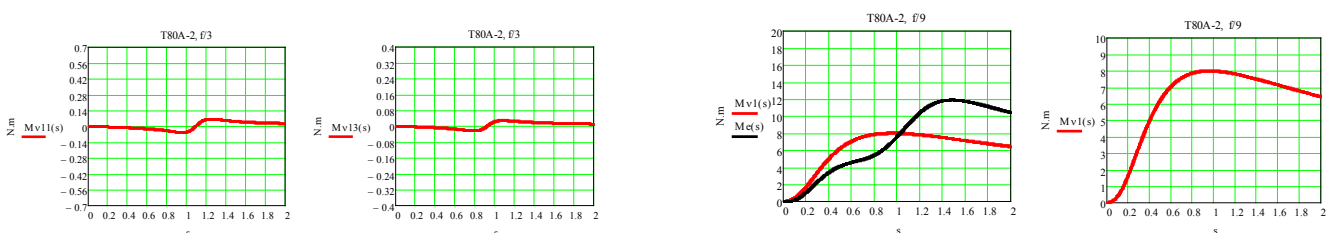
Фиг. 13. Еквивалентна механична характеристика и характеристики от първи хармоник и хармоници с по-висок номер за честота $f_{MP}/3$

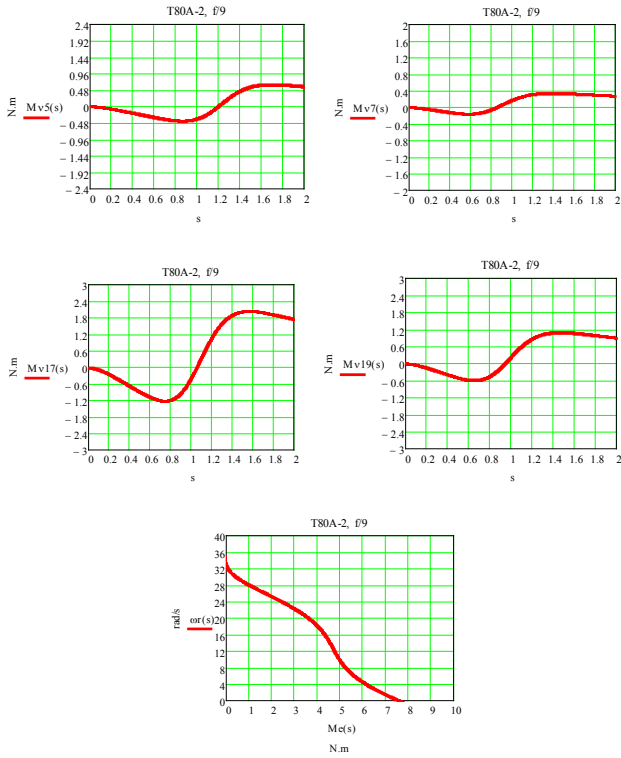
Механичните характеристики за честота $f_{MP}/6$ са показани на следващите фигури:



Фиг.14. Еквивалентна механична характеристика и характеристики от първи хармоник и хармоници с по-висок номер за честота $f_{MP}/6$

Характеристиките за честота $f_{MP}/9$, са показани на фиг. 15:





Фиг.15. Еквивалентна механична характеристика и характеристики от първи хармоник и хармоници с по-висок номер за честота $f_{mp}/9$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механична характеристика за работна честота $f_{mp}/3$ - висшите хармоници с номера пети и седми, имат изявено влияние, като останалите с по-висок номер имат незначително въздействие. Негативното влияние на пети хармоник се изразява с намаляване на претоварващата и пускова способност на електродвигателя. Седми хармоник за същата работна честота не определя провал в еквивалентната механична характеристика с необходимия въртящ момент за устойчива работа в околностите на точката на синхронното му хлъзгане.

Механичните характеристики за честота $f_{mp}/6$ се отличават с повишената претоварваща и пускова способност в сравнение с предходната честота. Наблюдава се минимална стойност на момента, превишаваща критичната стойност за честота $f_{mp}/3$, обусловена от повишените стойности на единадесети и тринадесети хармоници. Възможна е устойчива работа в участъка на механичната характеристика $M_{II} \div M_{мин}$.

Понижението на честотата при $f_{mp}/9$ пусковия момент се повишава, като се оказва и максимален за съответната механична характеристика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ангелов, А., Д. Димитров, Електрически машини I.- София, "Техника", 1976.
- [2] Lander, C. Power Electronics, London, McGraw – Hill, 1993.
- [3] Кирьянов, Д. Mathcad 13, Петербург, БХВ, 2006.
- [4] Sandeep P., H. Dalvi, Simulation of Cycloconverter Based Three Phase Induction Motor - IJAET. ISSN: 2231-1963 July 2011.
- [5] Петков, Ц., Синтез и изследване на токовете на електрозадвижваща система с еднофазно трифазен циклоконвертор, „Известия” на ТУ- Габрово 2013.