

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАГРЯВАНЕТО И ДОПУСТИМОТО НАТОВАРВАНЕ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ

Бохос Р. Апрахамян, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
 Мелине О. Апрахамян, Технически университет, Варна
 Любомир Й. Дънков, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

INVESTIGATION OF THE HEATING AND THE ADMISSIBLE LOAD OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES

Bohos R. Arahamian, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
 Meline O. Arahamian, Technical University, Varna
 Lyubomir J. Dankov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: In this paper we investigate the means to provide optimal working conditions of 3-phase induction motors in variable frequency drives without exceeding the insulation permissible temperature.
Key words: 3-phase induction motor, heating, frequency control, variable frequency drive.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Регулирането на скоростта на асинхронните двигатели чрез изменение на честотата на захранващото напрежение е най-разпространеният и най-икономичният метод за регулиране на скоростта на асинхронните електрозадвижвания.

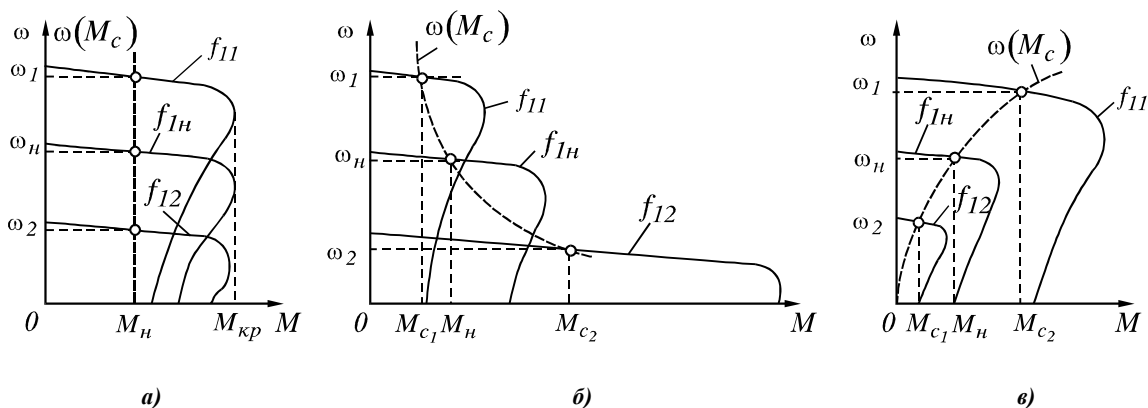
Синхронната скорост на асинхронните електродвигатели ω_c зависи от честотата на захранващото напрежение f_1 . При регулиране на честотата възниква необходимост и от регулиране на захранващото напрежение U . Критичният момент $M_{кр}$ може да се запази постоянен при изменение на честотата f_1 , само ако едновременно се изменя и напрежението U , така че $U/f_1 = const$. Законът на изменение на напрежението U при регулиране на честотата зависи от характера на натоварването на двигателя [4].

Тъй като критичното хлъзгане на двигателя $s_{кр}$

е обратнопропорционално на честотата f_1 , при регулиране на скоростта под основната (при честота f_{12}) твърдостта на механичните характеристики нараства. При регулиране на скоростта над основната поради механични ограничения честотата f_{11} обикновено не надвишава 2-2,5 пъти номиналната честота $f_{1н}$.

На фиг. 1 са показани механични характеристики на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор при честотно регулиране при различно статично натоварване. При съпротивителен момент $M_c = const$ отношението $U/f_1 = const$ - фиг. 1а. При статична мощност $P_c = M_c \omega = const$ отношението $U/\sqrt{f_1} = const$ - фиг. 1б. При вентилаторна характеристика на съпротивителния момент отношението $U/f_1^2 = const$ - фиг. 1в.

Публикацията разглежда две противоречиви топ-



Фиг. 1. Механични характеристики на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор при честотно управление:

а) $M_c = const, U/f_1 = const$; б) $P_c = M_c \cdot \omega = const, U/\sqrt{f_1} = const$; в) вентилаторна характеристика на съпротивителния момент, $U/f_1^2 = const$

линни явления, наблюдавани при честотното управление на асинхронни двигатели. От една страна при най-разпространените самовентилиращи се двигатели при намаляване на скоростта се намалява и топлоотдаването на машината, поради което, за да не се надвиши допустимата температура на изолацията трябва да се намали натоварването на двигателя. От друга страна при скорости под основната при номинален момент на двигателя се намаляват загубите в стотаната на машината, което позволява намаляването на натоварването да се ограничи.

2. УРАВНЕНИЕ НА ТОПЛИНИЯ БАЛАНС ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ

Известно е, че лимитиращата нагряването част на асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор е изолацията на статорната намотка [1]. Средното установено прегряване на намотката на статора може да бъде определено по метода на еквивалентните загуби [2]. Съгласно този метод уравнението на топлинния баланс е следното:

$$(1) \quad \theta_{уст} \cdot A(\alpha) = \Delta p_{ел1} + \kappa_p(\alpha) \cdot \Delta p_{ел2} + \kappa_{ст}(\alpha) \cdot \Delta p_{ст} + \kappa_{мех} \cdot \Delta p_{мех} \quad ,$$

където $\theta_{уст}$ е установеното прегряване на двигателя, $A(\alpha)$ - топлоотдаването на двигателя, зависещо от ъгловата скорост, $\alpha = \frac{f}{f_{1н}}$ - относителна промяна на честотата на захранващото напрежение спрямо номиналната честота, $\Delta p_{ел1}$ - електрическите загуби в статорната намотка, $\Delta p_{ел2}$ - електрическите загуби в роторната намотка, $\Delta p_{ст}$ - загуби в стотаната на двигателя, $\Delta p_{мех}$ - механични загуби, коефициентите $\kappa_p(\alpha)$, $\kappa_{ст}(\alpha)$, $\kappa_{мех}$ - коефициенти, отчитащи съответно влиянието на електрическите загуби в ротора, на загубите в стотаната и на механичните загуби върху нагряването на статорната намотка. Коефициентите $\kappa_p(\alpha)$ и $\kappa_{ст}(\alpha)$ зависят от ъгловата скорост, респективно от честотата на захранващото напрежение, защото ъгловата скорост $\omega = \frac{2\pi f}{p}$, където p са чифтовете полюси на машината.

Механичните загуби $\Delta p_{мех}$ оказват слабо влияние върху повишението на температурата на статорната намотка [2] и могат да бъдат пренебрегнати, Тогава уравнение (1) може да бъде записано във вида:

$$(2) \quad \theta_{уст} \cdot A(\alpha) = \Delta p_{ном} \left[i^2 \cdot \rho_{ел}(\alpha) + \varphi^2 \cdot \sigma_{ст} + a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2 \right] ,$$

където $\rho_{ел}(\alpha) = a_{ел1} \cdot a_{ел2} \cdot \kappa_p(\alpha)$ е коефициент на променливите загуби, $\sigma_{ст}(\alpha) = a_{ст} \cdot \kappa_{ст}(\alpha)$ - коефициент на загубите в стотаната, $\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n}$ - относителен магнитен поток на двигателя спрямо номиналния, i_{μ} - намагнитващ ток на машината, определящ загубите от хистерезис и токове на Фуко в машината, $a_{ел1}$, $a_{ел2}$, $a_{ст}$, a_{μ} - коефициенти, постоянни за дадена машина и характеризиращи относителния дял на различните видове загуби в номиналните загуби на двигателя $\Delta n_{ном}$.

Коефициентите $\kappa_p(\alpha)$ и $\kappa_{ст}(\alpha)$ се определят с изразите

$$\kappa_p(\alpha) = 1 - \frac{(1 - k_{рн})\alpha^{0,6}}{k_{рн} + (1 - k_{рн})\alpha^{0,6}} \quad ,$$

$$\kappa_{ст}(\alpha) = 1 - \frac{k_{стн}}{k_{стн} + (1 - k_{стн})\alpha^{0,6}} \quad ,$$

където $k_{рн}$ и $k_{стн}$ са стойностите на коефициентите при номинална скорост на двигателя. Обикновено те са в границите $k_{рн} = 0,35 - 0,8$ и $k_{стн} = 0,6 - 0,92$, като по-ниските значения съответстват на по-бързоходните двигатели (с по-малък брой полюси).

За номинален режим уравнението (2) приема вида:

$$(3) \quad \theta_{уст ном} \cdot A_{ном} = \sum \Delta p_i = \Delta p_{ном} \cdot h \quad ,$$

където h е относителната стойност на загубите в машината спрямо номиналните загуби:

$$h = \frac{\sum \Delta p_i}{\Delta p_{ном}} \quad .$$

Като се разделят почленно (2) и (3) се получава уравнение на топлинния баланс при честотно управление:

$$(4) \quad h \cdot \chi(\alpha) \cdot \frac{\theta_{уст}}{\theta_{уст ном}} = i^2 \cdot \rho_{ел}(\alpha) + \varphi^2 \cdot \sigma_{ст}(\alpha) + a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2 \quad ,$$

където $\chi(\alpha) = \frac{A(\alpha)}{A_{ном}}$ е коефициент на относително изменение на топлоотдаването при промяна на ско-

ростта (честотата).

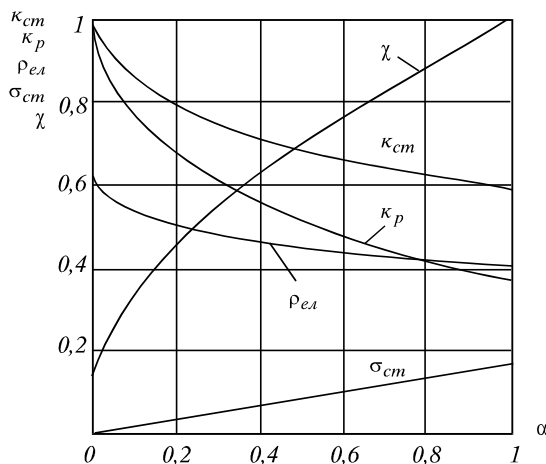
На практика обикновено коефициентът h е в границите 0,6 – 0,8, като по-ниските стойности съответстват на бързоходни двигатели с голяма мощност, а по-високите - на бавноходни двигатели с малка мощност.

Зависимостта на коефициента $\chi(\alpha)$ от скоростта (честотата) на двигателя се определя с формулата

$$\chi(\alpha) = \chi_0 + (1 - \chi_0)\alpha^{0,6},$$

където χ_0 е коефициент на промяна на топлоотдаването при неподвижен двигател. Обикновено χ_0 е в границите 0,15 – 0,55 [3].

Зависимостите на коефициентите $\rho_{ел}$, $\sigma_{см}$, k_p , $k_{см}$ и χ от относителния коефициент на честотата α за двигател с номинална мощност $P_H = 100 \text{ kW}$ и номинална синхронна честота на въртене $n_{сн} = 3000 \text{ min}^{-1}$ са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. Зависимости на топлинните коефициенти от честотата за двигател с $P_H = 100 \text{ kW}$ и $n_{сн} = 3000 \text{ min}^{-1}$

От фиг. 2 се вижда, че коефициентът на загубите в стоманата $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява с намаляване на честотата практически линейно, но коефициентът на относителния дял на загубите в стоманата върху нагряването на статорната намотка $k_{см}(\alpha)$ интензивно нараства с намаляване на честотата. В електротехническите стомани преобладават загубите от хистерезис. В нисколегираните стомани относителният дял на загубите от вихрови токове е по-висок и коефициентът $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява по-бързо. Обратно, коефициентът на загубите в медта $\rho_{ел}(\alpha)$ нараства при намаляване на честотата заедно с коефициента $k_p(\alpha)$, което е

неблагоприятно за нагряването на машината и снижава положителния ефект от намаляването на коефициента на загубите в стоманата $\sigma_{см}(\alpha)$.

Затова определящо влияние върху големината на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, оказва коефициентът на топлоотдаване $\chi(\alpha)$.

3. МАКСИМАЛЕН МОМЕНТ НА ДВИГАТЕЛЯ, ДОПУСТИМ ОТ ТОПЛИННА ГЛЕДНА ТОЧКА, ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ

Относителното значение на максимално допустимия ток на двигателя при честотно управление може да се получи като се реши спрямо тока уравнение (4):

$$(5) \quad i_{max}^2 = \frac{h \cdot \chi(\alpha) - \varphi^2 \cdot \sigma_{см}(\alpha) - a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2}{\rho_{ел}(\alpha)}$$

Най-често натоварването на асинхронните двигатели се колебае в границите $M_c = (0,5 - 1,0)M_H$, където M_H е номиналният момент на двигателя:

$$M_H = c_M \cdot I_{2H}' \cdot \Phi_H \cdot \cos \varphi_{2H}, [1].$$

Моментът на двигателя в относителни единици при честота, различна от номиналната е:

$$\mu = \frac{M(\alpha)}{M_H} = i \cdot \varphi \cdot \frac{\cos \varphi_2(\alpha)}{\cos \varphi_{2H}}$$

При честотно управление хлъзгането на двигателя се променя слабо, а оттам и факторът на мощността се променя слабо. Затова се приема, че

$$\frac{\cos \varphi_2(\alpha)}{\cos \varphi_{2H}} \approx 1$$

или

$$(6) \quad \mu = i \cdot \varphi$$

Като се замести (6) в (5), се получава:

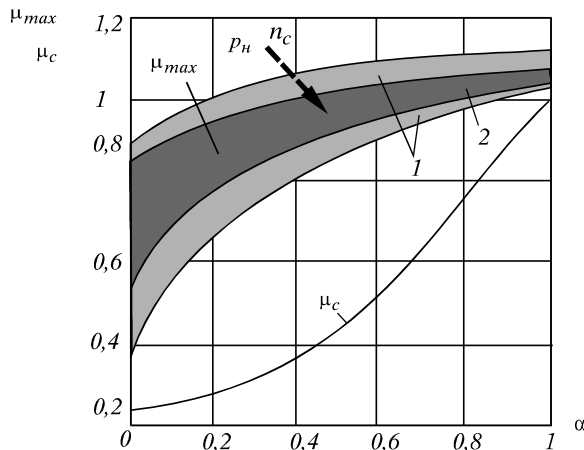
$$(7) \quad \mu_{max} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \chi(\alpha) - \varphi^2 \cdot \sigma_{см}(\alpha) - a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2}{\rho_{ел}(\alpha)}}$$

Формула (7) показва зависимостта на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, от честотата и магнитния поток. В този си вид тя е валидна само при постоянен магнитен поток, т.е. при $\varphi = const$. При променлив магнитен поток уравнение (7) се усложнява и може да се реши аналитично само при линеен закон на промяна на потока [2].

От уравнение (7) може да се направи извода, че допустимият относителен момент μ_{max} при намаляване на честотата се понижава в по-малка степен, отколкото топлоотдаването на двигателя ако коефициентът на загубите в стоманата $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява

по-бързо от коефициента на промяна на топлоотдаването $\chi(\alpha)$. Това е валидно за всички видове честотно управляеми асинхронни двигатели.

На фиг. 3 са представени приблизителните граници на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, при честотно управление на двигатели от две серии – 4А и 4АО. На фигурата със стрелка е показана посоката на нарастване на номиналната мощност P_n и на синхронната скорост n_c на машината. С μ_c е означена характеристиката на относителното статично натоварване. Прието е, че съпротивителният момент е от вентилаторен тип.



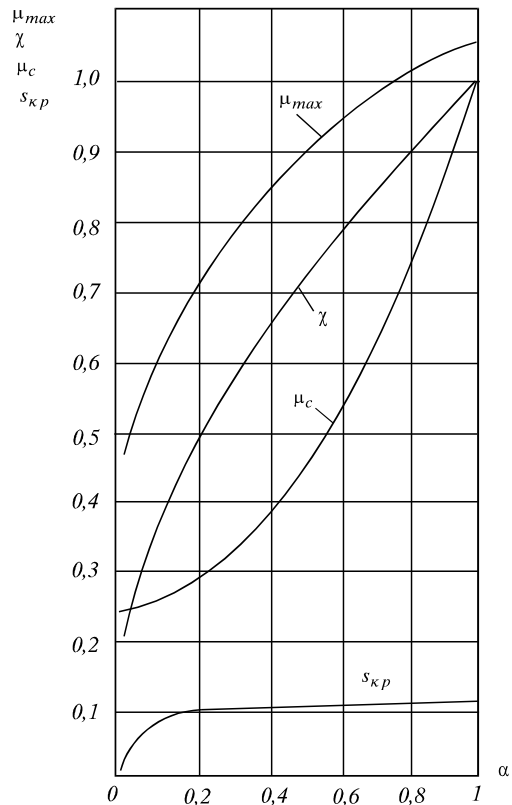
Фиг. 3. Ориентировъчни граници на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, при честотно управление с постоянен магнитен поток $\Phi = const$; зона 1 се отнася за асинхронни двигатели от серия 4А, а зона 2 - за асинхронни двигатели от серия 4АО

4. ОБОБЩЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самовентилиращите се асинхронни двигатели са най-разпространените асинхронни машини. Целесъобразно е те да се използват при статично натоварване с характеристика от вентилаторен тип [5]. Характерът на изменението на момента в зависимост от скоростта при вентилаторен тип натоварване на двигателя съответства на тенденцията на промяна на топлоотдаването. Даже моментът по вентилаторната характеристика намалява по-бързо, отколкото намаляват топлоотдаването и максималният момент, допустим от топлинна гледна точка - фиг. 4. Експериментално е установено [2], че за всички самовентилиращи се асинхронни двигатели с номинална мощност от 0,6 kW до 100 kW при всяка честота на захранващото напрежение статичният вентилаторен момент е по-малък от максимално допустимия момент на двигателя от топлинна гледна точка.

Следователно при вентилаторен тип натоварване могат да се използват самовентилиращи се двигатели без повишаване на необходимата мощност при всеки

диапазон на честотно регулиране на ъгловата скорост на машината. При това удовлетворителни механични характеристики, съответстващи на вентилаторния тип натоварване се постигат и при най-простия закон на честотно управление $U/f_1 = const$. Честотното управление на самовентилиращи се асинхронни двигатели е най-рационално при електрозадвигвания, имащи вентилаторен тип натоварване.



Фиг. 4. Зависимости на максималния момент, допустим от топлинна гледна точка μ_{max} ; относителният коефициент на топлоотдаване $\chi(\alpha)$ и критичното хлъзгане $s_{кр}$ от относителната честота $\alpha = \frac{f}{f_{1n}}$ при двигател с номинална мощност $P_n = 100 \text{ kW}$ и номинална синхронна скорост $n_{сн} = 3000 \text{ min}^{-1}$; с μ_c е означена характеристиката на относителното статично натоварване от вентилаторен тип

ЛИТЕРАТУРА

1. В о л д е к, А. Електрические машины. М., "Энергия", 1978.
2. С а н д л е р, А., Р. Сарбатов. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М., "Энергия", 1974.
3. К о п ы л о в, И. Проектирование электрических машин. М., "Высшая школа", 2002.
4. Й о р д а н о в, Д. Основи на електрозадвигването. С., "Техника", 1978.
5. К о п ы л о в, И. Електрические машины. М., "Энергоатомиздат", 1986.