

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298>

УДК 621.31.83.52

## Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода

Б. И. Фираго<sup>1)</sup>, С. В. Александровский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** По сравнению с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами синхронные имеют меньшие потери мощности, жесткие механические характеристики без обратной связи по скорости, самое простое частотное управление (когда напряжение изменяется пропорционально частоте). Проведено аналитическое исследование энергетических показателей (потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности) частотно-регулируемого синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов. Коэффициент полезного действия силового преобразователя, в рассматриваемом случае преобразователя частоты, зависит от структуры преобразователя (одно- или двухзвенный), применяемых силовых полупроводниковых приборов, дополнительных элементов (дросселей, конденсаторов, трансформаторов, активных сопротивлений и т. д.). КПД синхронного электродвигателя, входящего сомножителем в общий КПД регулируемого синхронного электропривода, представляет интерес при скалярном частотном управлении этого синхронного двигателя, так как публикаций на данную тему почти нет. Поэтому рассмотрена эффективность преобразования энергии синхронным двигателем, который получает ее от преобразователя частоты при различных частотах и преобразует в механическую энергию. В целях удобства аналитического исследования использовали широко применяемое понятие относительной частоты как отношение текущего значения частоты напряжения к номинальному. Показано, что максимум КПД смещается в сторону меньшего коэффициента загрузки при уменьшении относительной частоты питающего двигателя напряжения. Разработанная методика расчета энергетических показателей частотно-регулируемого синхронного двигателя иллюстрируется графиками КПД и  $\cos\varphi$  для двигателя типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6 кВ и синхронного двигателя с постоянными магнитами типа YGT132S4 мощностью 5,5 кВт.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, частотное управление, потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности

**Для цитирования:** Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4. С. 287–298. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298>

---

### Адрес для переписки

Фираго Бронислав Иосифович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-61  
[eaup@bntu.by](mailto:eaup@bntu.by)

### Address for correspondence

Firago Bronislav I.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-61  
[eaup@bntu.by](mailto:eaup@bntu.by)

---

## Energetic Factors of a Frequency-Controlled Synchronous Electric Drive

B. I. Firago<sup>1)</sup>, S. V. Aleksandrovsky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** As compared to asynchronous frequency-controlled electric drives, synchronous drives are characterized by lower power losses, rigid mechanical characteristics without speed feedback and by the simplest law of frequency control (when the voltage changes proportionally to the frequency). An analytical study of energy factors (power loss, efficiency, power factor) of frequency-controlled synchronous motor with electromagnetic ignition and with excitation caused by permanent magnets has been fulfilled. The efficiency of the power converter, in this case (i. e. in the case of the frequency converter), depends on the structure of the converter (single-link or two-link), on the power semiconductor devices being used, on additional elements (i. e. chokes, capacitors, transformers, active resistance, etc.). The efficiency of a synchronous electric motor (which is a cofactor of general efficiency of a controlled synchronous electric drive) is of an interest in the scalar frequency control of the mentioned synchronous motor, since there are almost no publications on this subject. Therefore, the energy conversion efficiency of the synchronous motor, which receives energy from the frequency converter at different frequencies and converts to mechanical energy, has been considered. For the convenience of analytical research, we used the widely used concept of relative frequency as the ratio of the current value of the voltage frequency to the nominal one. It is demonstrated that the maximum efficiency is shifted in the direction of a lower load factor with a decrease in the relative frequency of the motor supply voltage. The method of calculating the energy performance of variable frequency synchronous motor that has been developed is illustrated by the graphs of efficiency and  $\cos\varphi$  for the engine of the SD3 13-34-6 type of the capacity of 500 kW and of a voltage of 6 kV and for a synchronous motor with permanent magnets of the YGT132S4 type of a capacity of 5.5 kW.

**Keywords:** synchronous motor, frequency control, power losses, efficiency, power factor

**For citation:** Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2018) Energetic Factors of a Frequency-Controlled Synchronous Electric Drive. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (4) 287–298. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298> (in Russian)

### Введение

Долгое время основной областью применения синхронных электродвигателей (СД) был нерегулируемый электропривод средней и большой мощности. Стремление к экономии электроэнергии при изменении производительности механизмов, приводимых в движение синхронными электродвигателями, привело к развитию регулируемых синхронных электроприводов. В настоящее время это частотно-регулируемые электроприводы, где синхронные электродвигатели применяются в двух вариантах:

1) при изменении частоты питающего напряжения в функции угловой скорости двигателя и управлении преобразователем частоты по углу положения ротора – так называемые вентильные двигатели, или, по-другому, двигатели с электронной коммутацией тока якоря [1–4];

2) при независимом задании частоты на выходе преобразователя, аналогично частотному управлению асинхронными двигателями, при этом величина напряжения изменяется в функции задаваемой частоты с учетом принятого закона частотного управления [5, 6].

В первом варианте частотного управления СД характеристики и свойства его подобны характеристикам и свойствам двигателя постоянного тока [4]. Поэтому вентильные синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов в настоящее время применяются как в маломощных электроприводах (так называемых сервоприводах) [1–3], так и в приводах средней и большой мощности, особенно при векторном управлении [3, 7]. Достигнуты значительные успехи в теоретическом исследовании и практической реализации этих электроприводов.

В меньшей мере исследованы более простые частотно-регулируемые синхронные электродвигатели при скалярном частотном управлении, когда поддерживается постоянный магнитный поток (обычно на номинальном уровне). Такие электродвигатели средней мощности могут обеспечить экономичное регулирование производительности механизмов с постоянным статическим моментом за счет изменения скорости. В связи с этим представляет интерес исследовать энергетические показатели (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности) в частотно-регулируемом синхронном электродвигателе. Определение энергетических показателей основано на расчете потерь мощности, которые также используются в качестве критерия проверки двигателя по нагреву при циклическом характере нагрузки.

Рассматриваемые в статье вопросы базируются на публикации [8]. Приведем аналитический метод расчета энергетических показателей синхронного частотно-регулируемого электропривода.

#### **Потери мощности и коэффициент полезного действия синхронного электродвигателя при скалярном частотном управлении**

Потери мощности при исследовании коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  синхронного частотно-регулируемого электропривода рассматриваются для установившегося режима работы синхронного двигателя, когда  $\omega = \omega_0 = \text{const}$ . Поэтому демпферная обмотка не оказывает никакого влияния на потери мощности, так как при  $\omega = \omega_0$  в демпферной обмотке отсутствуют токи.

В регулируемом электроприводе сохраняется деление потерь на так называемые постоянные и переменные [9, 10]. К постоянным относят потери мощности, практически не зависящие от нагрузки. В частотно-регулируемом СД постоянные потери мощности состоят:

- из потерь на возбуждение  $\Delta P_{\text{в}}$ ;
- из потерь в стали статора [9]

$$\Delta P_{\text{ст1}} = \Delta P_{\text{ст1,ном}} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_{1,\text{ном}}} \right)^q; \quad (1)$$

- из механических потерь

$$\Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{мх,ном}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\Phi$ ,  $\Phi_{\text{ном}}$  – текущее и номинальные значения магнитного потока;  $f_1$ ,  $f_{1,\text{ном}}$  – то же частоты изменения питающего статор напряжения;  $\Delta P_{\text{ст1,ном}}$  – номинальные потери в стали статора;  $q$  – показатель степени, характеризующий потери в стали от изменения частоты, который находится в пределах 1,3–1,5, для современных электротехнических сталей рекомендуют принимать  $q = 1,5$ ;  $\omega$ ,  $\omega_{\text{ном}}$  – текущее и номинальные значения угловой скорости ротора;  $\Delta P_{\text{мх,ном}}$  – номинальные механические потери.

В основном диапазоне частотного регулирования скорости магнитный поток поддерживается постоянным, обычно равным номинальному. Поэтому в указанном диапазоне постоянные потери

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст1,ном}} \left( \frac{f_1}{f_{1,\text{ном}}} \right)^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{в,ном}}. \quad (3)$$

Переменные потери частотно-регулируемого СД включают потери в обмотке статора

$$\Delta P_{\text{пер1}} = 3I_1^2 R_1, \quad (4)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока фазы статора, имеющего активное сопротивление  $R_1$ .

Если ввести:

- относительную частоту  $\alpha$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1,\text{ном}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0,\text{ном}}}; \quad (5)$$

- относительную угловую скорость ротора  $\nu$

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{\omega}{\omega_{0,\text{ном}}}; \quad (6)$$

- относительный ток статора  $\iota_1$

$$\iota_1 = \frac{I_1}{I_{1,\text{ном}}}; \quad (7)$$

- относительный момент  $\mu$

$$\mu = \frac{M}{M_{\text{ном}}}, \quad (8)$$

то суммарные потери мощности в частотно-регулируемом СД в установившемся режиме, когда  $\omega = \omega_0 = \text{const}$ , можно записать в виде

$$\Delta P = \Delta P_{\text{в,ном}} + \Delta P_{\text{ст1,ном}} \alpha^{1.5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{пер1,ном}} \iota_1^2, \quad (9)$$

где  $\Delta P_{\text{пер1,ном}} = 3I_{1,\text{ном}}^2 R_1$ .

Для удобства расчетов необходимо найти функциональную зависимость между  $\iota_1$  и  $\mu$ . Действующее значение тока статора  $I_1$  определяют через составляющие токов  $I_{1q}$  и  $I_{1d}$  по оси  $d$ - $q$  при допущении  $R_1 = 0$  [4]

$$I_1 = \sqrt{I_{1d}^2 + I_{1q}^2}, \quad (10)$$

где

$$I_{1q} = -\frac{U_1 \sin \theta_{\text{эл}}}{X_{1q}}; \quad (11)$$

$$I_{1d} = \frac{E_1 - U_1 \cos \theta_{\text{эл}}}{X_{1d}}; \quad (12)$$

$U_1$ ,  $E_1$  – действующее значение фазного напряжения статора и фазной ЭДС взаимной индукции;  $X_{1d}$ ,  $X_{1q}$  – индуктивное сопротивление СД по осям  $d$ - $q$ .

При частотном управлении СД с постоянным магнитным потоком существуют зависимости [8]:

$$\omega_0 = \alpha \omega_{0,\text{ном}}; \quad U_1 = \alpha U_{1,\text{ном}}; \quad E_1 = \alpha E_{1,\text{ном}}; \quad (13)$$

$$X_{1d} = \alpha X_{1d,\text{ном}}; \quad X_{1q} = \alpha X_{1q,\text{ном}},$$

где величины с индексом «ном» относят к номинальной частоте  $f_{1,\text{ном}}$ .

Вводя относительные значения токов по осям  $q$  и  $d$ :

$$\iota_{1q}^* = \frac{I_{1q}}{I_{1,\text{ном}}}; \quad \iota_{1d}^* = \frac{I_{1d}}{I_{1,\text{ном}}} \quad (14)$$

и используя соотношения (11), (12) и (13), можно получить зависимости:

$$\iota_{1q}^* = -\frac{\sin \theta_{\text{эл}}}{X_{1q}^*}; \quad \iota_{1d}^* = \frac{k_1 - \cos \theta_{\text{эл}}}{X_{1d}^*}, \quad (15)$$

где  $X_{1q}^* = \frac{I_{1,\text{ном}} X_{1q,\text{ном}}}{U_{1,\text{ном}}}$ ,  $X_{1d}^* = \frac{I_{1,\text{ном}} X_{1d,\text{ном}}}{U_{1,\text{ном}}}$  – относительное индуктивное со-

противление СД по осям  $q$  и  $d$ ;  $k_1 = \frac{E_{1,\text{ном}}}{U_{1,\text{ном}}}$ ;  $\theta_{\text{эл}}$  – электрический угол

нагрузки СД.

Квадрат относительного тока статора, который входит в выражение переменных потерь статора, теперь можно записать в виде

$$I_1^2 = \frac{\sin^2 \theta_{эл}}{X_{1q}^{*2}} + \frac{(k_1 - \cos \theta_{эл})^2}{X_{1d}^{*2}}. \quad (16)$$

Связь между углом  $\theta_{эл}$  и относительным моментом  $\mu$  находим из линеаризованной угловой характеристики [8, 9]

$$M = \frac{M_{ном}}{\theta_{эл,ном}} \theta_{эл}$$

в виде

$$\theta_{эл} = \mu \theta_{эл,ном}. \quad (17)$$

После этого выражаем переменные потери мощности в статоре через относительный электромагнитный момент

$$\Delta P_{пер1} = \Delta P_{пер1,ном} \left[ \frac{\sin^2(\mu \theta_{эл,ном})}{X_{1q}^{*2}} + \frac{[k_1 - \cos(\mu \theta_{эл,ном})]^2}{X_{1d}^{*2}} \right]. \quad (18)$$

В том случае, когда для проверки электродвигателя по нагреву используется метод средних потерь мощности за цикл нагрузочной диаграммы, т. е. с учетом переходных процессов, необходимо учитывать переменные потери в демпферной обмотке ротора, которые удобно выразить через момент

$$\Delta P_{пер2} = M(t) [\omega_0(t) - \omega(t)], \quad (19)$$

где  $M(t)$ ,  $\omega_0(t)$ ,  $\omega(t)$  – момент, синхронная скорость и скорость ротора в переходном процессе, определяемые в соответствии с [8].

КПД двигателя определяется как отношение выходной мощности на валу  $P_2$  к входной электрической мощности  $P_1$

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (20)$$

Выходную мощность синхронного двигателя выражаем через момент на валу  $M_2$  и угловую скорость ротора  $\omega = \omega_0$

$$P_2 = M_2 \omega_0 \approx M \omega_0,$$

где  $M = M_2 + \Delta M$  – электромагнитный момент двигателя;  $\Delta M$  – потеря момента, обусловленная механическими потерями.

В установившемся режиме работы с учетом (5) и (8) механическую мощность  $P_2$  на валу СД можно выразить таким образом:

$$P_2 = \alpha \mu P_{ном}. \quad (21)$$

Подставляем (9), (18) и (21) в (20) и получаем общее выражение для КПД СД при скалярном частотном управлении

$$\eta_d = \frac{\alpha \mu P_{\text{ном}}}{\alpha \mu P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{в,ном}} + \Delta P_{\text{ст1,ном}} \alpha^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{пер,1ном}} \left( \frac{\sin^2(\mu \theta_{\text{эл,ном}})}{X_{1q}^{*2}} + \frac{[k_1 - \cos(\mu \theta_{\text{эл,ном}})]^2}{X_{1d}^{*2}} \right)} \quad (22)$$

Анализ (22) показывает, что КПД является функцией двух независимых переменных: относительной частоты  $\alpha$  и относительного момента  $\mu$ .

Для иллюстрации теоретических исследований проведены расчеты КПД синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6000 В по формуле (22) при изменении относительного момента  $0 \leq \mu \leq 1,9$  для ряда значений относительной частоты  $\alpha = 0,1; 0,5; 1,0$  (рис. 1).

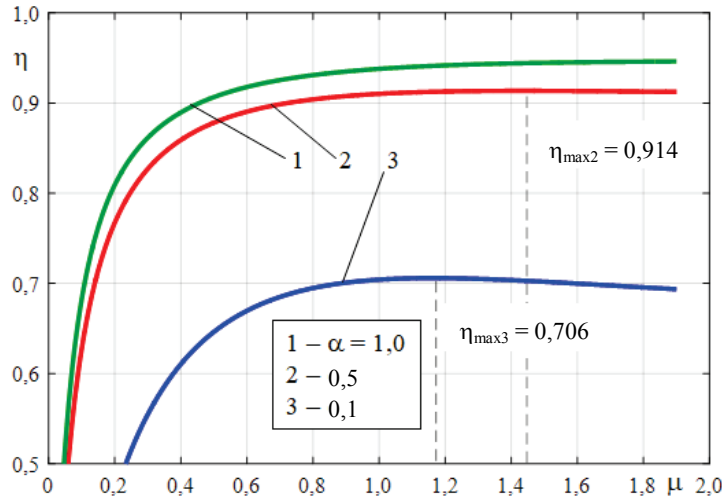


Рис. 1. Зависимость коэффициента полезного действия синхронного электродвигателя типа СДЗ 13-34-6 от относительного момента

Fig. 1. The dependence of the efficiency of the synchronous motor of SD3 13-34-6 the type on the relative torque

### Потери мощности и коэффициент полезного действия синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении

Потери мощности в частотно регулируемом синхронном двигателе с постоянным магнитным потоком состоят из постоянных потерь

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{ст1,ном}} \left( \frac{f_1}{f_{1,ном}} \right)^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \left( \frac{\omega}{\omega_{0,ном}} \right)^2$$

и переменных потерь от протекания тока  $I_1$  по трем фазам обмотки статора, определяемых по (4).

Теперь постоянные потери мощности с учетом (5) можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст1,ном}} \alpha^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \alpha^2 \approx \Delta P_{\text{пост,ном}} \alpha^2,$$

где  $\Delta P_{\text{пост,ном}} = \Delta P_{\text{ст1,ном}} + \Delta P_{\text{мх,ном}}$ .

При постоянном магнитном потоке относительный ток статора  $i_1$  является коэффициентом загрузки  $k_3$ , т. е.

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1,\text{ном}}} \approx \frac{M}{M_{\text{ном}}} = \mu = k_3.$$

При таком допущении суммарные потери в частотно-регулируемом синхронном двигателе с постоянными магнитами запишутся

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер1}} = \Delta P_{\text{пост1,ном}} \alpha^2 + k_3^2 \Delta P_{\text{пер1,ном}} = \\ &= \Delta P_{\text{пер1,ном}} \left( \frac{\Delta P_{\text{пост,ном}}}{\Delta P_{\text{пер1,ном}}} \alpha^2 + k_3^2 \right). \end{aligned}$$

Обозначим относительные постоянные потери мощности в частотно-регулируемом синхронном двигателе с постоянными магнитами

$$p_0^* = \frac{\Delta P_{\text{пост,ном}}}{\Delta P_{\text{пер1,ном}}}.$$

В результате получаем выражение потерь мощности в виде

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер1,ном}} (p_0^* \alpha^2 + k_3^2). \quad (23)$$

Подставляем (23) и (21) в (20) и получаем общее выражение для КПД синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении

$$\eta_d = \frac{k_3 \alpha P_{\text{ном}}}{k_3 \alpha P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{пер1,ном}} (p_0^* \alpha^2 + k_3^2)}.$$

Разделив числитель и знаменатель на  $P_{\text{ном}}$ , получим уравнение

$$\eta_d = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер1,ном}}}{P_{\text{ном}}} \cdot \frac{p_0^* \alpha^2 + k_3^2}{k_3 \alpha} \right]^{-1}.$$

Обозначим

$$\Delta P_{\text{пер1,ном}}^* = \frac{\Delta P_{\text{пер1,ном}}}{P_{\text{ном}}},$$

тогда

$$\eta_d = \left[ 1 + \Delta P_{\text{пер1,ном}}^* \frac{p_0^* \alpha^2 + k_3^2}{k_3 \alpha} \right]^{-1}. \quad (24)$$



При  $\alpha = 1$  и  $k_3 = 1$  имеем номинальный КПД, т. е.  $\eta_d = \eta_{\text{ном}}$ . При этих условиях из (24) можно найти

$$\Delta P_{\text{пер1, ном}}^* = \frac{1}{p_0^* + 1} \left( \frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right)$$

и записать окончательное выражение для КПД синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами

$$\eta_d = \left[ 1 + \frac{1}{p_0^* + 1} \left( \frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{p_0^* \alpha^2 + k_3^2}{k_3 \alpha} \right]^{-1}. \quad (25)$$

Известно, что при работе электродвигателя с постоянным магнитным потоком максимум КПД наступает, когда постоянные потери равны переменным. Для рассматриваемого синхронного электродвигателя это соответствует равенству

$$\Delta P_{\text{пост1, ном}} \alpha^2 = k_{3, \text{опт}}^2 \Delta P_{\text{пер1, ном}},$$

откуда находим величину оптимального коэффициента загрузки  $k_{3, \text{опт}} = \alpha \sqrt{p_0^*}$ , при котором КПД принимает максимальное значение

$$\eta_{d, \text{max}} = \left[ 1 + \left( \frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{2\sqrt{p_0^*}}{p_0^* + 1} \right]^{-1}.$$

То есть при принятых допущениях максимум КПД остается таким же, как и для номинальной скорости  $\omega_0 = \omega_{0, \text{ном}}$  или  $\alpha = 1$ , но величина этого максимума достигается при меньшем коэффициенте загрузки, поскольку здесь рассматривается регулирование частоты  $\alpha$  и, соответственно, синхронной угловой скорости  $\omega_0$  в диапазоне частот  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 1$  или  $\omega_{\min} \leq \omega_0 \leq \omega_{0, \text{ном}}$ .

Следовательно, при принятых допущениях относительно зависимости постоянных потерь мощности от относительной частоты  $\alpha$  и коэффициента загрузки по моменту, равного коэффициенту загрузки по току, получили зависимость КПД частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с постоянными магнитами от относительной скорости  $\alpha$  и коэффициента загрузки  $k_3$  такого же характера, как и для асинхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянным магнитным потоком (потокосцеплением) [4]. Но КПД этого синхронного двигателя будет больше, чем у асинхронного двигателя, поскольку отсутствуют потери мощности в роторе при таком же развиваемом моменте.

Для иллюстрации теоретических исследований проведены расчеты КПД синхронного двигателя с постоянными магнитами типа YGT132S4 мощностью 5,5 кВт по формуле (25) при изменении коэффициента загрузки  $0 \leq k_3 \leq 1$  для ряда значений относительной частоты  $\alpha = 0,1; 0,5; 1,0$  (рис. 2).

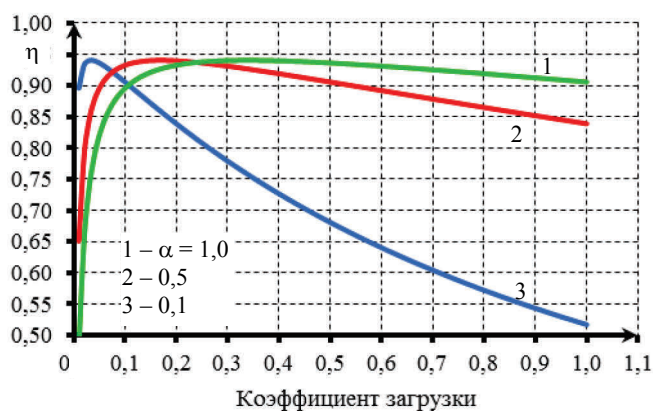


Рис. 2. Зависимость коэффициента полезного действия синхронного двигателя с постоянными магнитами типа YGT132S4 от коэффициента загрузки при различных значениях относительной частоты

Fig. 2. The dependence of the efficiency of the synchronous motor with permanent magnets of the YGT132S4 type on load factor for different values of relative frequency

### Коэффициент мощности частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

Коэффициент мощности  $\cos \varphi$  рассчитываем для первой гармоники питающего двигатель напряжения  $U_1$ , которое изменяется при частотном управлении по закону  $U_1 = \alpha U_{1, \text{ном}}$ , по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3U_1 I_1},$$

где  $P_1$  – потребляемая трехфазным синхронным двигателем активная мощность;  $U_1$  – действующее значение фазного напряжения обмотки статора;  $I_1$  – то же фазного тока статора.

Потребляемую двигателем мощность определяем следующим образом:

$$P_1 = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{пер1}} = M \omega_0 + \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{пер1}}. \quad (26)$$

С учетом принятых обозначений относительной частоты  $\alpha$  (5), относительного тока статора  $i_1$  (7), относительного момента  $\mu$  (8) выражение (26) можно записать в виде

$$P_1 = \alpha \mu P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ст1, ном}} \alpha^{1.5} + \Delta P_{\text{пер1, ном}} i_1^2. \quad (27)$$

Исходя из допустимого по условиям нагрева момента синхронного двигателя, получим следующую зависимость:

$$i_1^2 = \left( \frac{a}{X_c^*} \right)^2 - \frac{2a}{X_c^{*2}} + \frac{1}{X_c^{*2}} + \frac{a\mu^2}{(\lambda_m X_c^*)^2},$$

где  $a = \frac{E_{1, \text{ном}}}{U_{1, \text{ном}}}$ ;  $X_c^*$  – относительное значение синхронного индуктивного

сопротивления неявнополюсного синхронного двигателя;  $\lambda_m$  – номинальная перегрузочная способность синхронного двигателя.

Обозначим:

- относительные номинальные потери мощности в стали

$$q_1^* = \frac{\Delta P_{\text{ст1,ном}}}{P_{\text{ном}}};$$

- относительные номинальные переменные потери в обмотке статора

$$q_2^* = \frac{\Delta P_{\text{пер1,ном}}}{P_{\text{ном}}};$$

- относительную потребляемую активную мощность синхронного двигателя

$$q^* = \frac{P_1}{P_{\text{ном}}}.$$

Теперь  $\cos \varphi$  можно представить в виде

$$\cos \varphi = \frac{q^*}{\alpha I_1} \cdot \frac{P_{1,\text{ном}}}{3U_{1,\text{ном}}I_{1,\text{ном}}}.$$

По полученным выражениям произведем расчет и построение коэффициента мощности синхронного двигателя с постоянными магнитами типа YGT132S4 в функции относительного момента  $0,1 \leq \mu \leq 1$  для  $\alpha = 0,1; 0,5; 1,0$  (рис. 3).

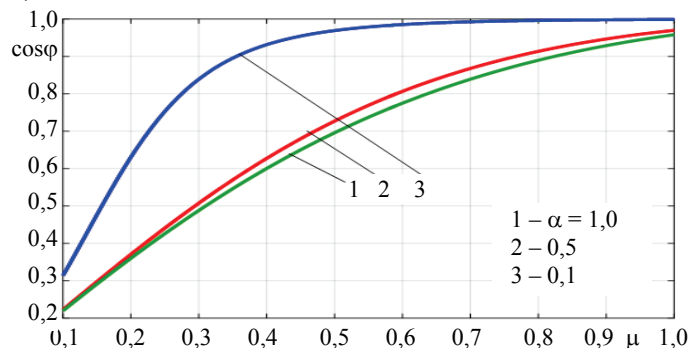


Рис. 3. Зависимость коэффициента мощности синхронного двигателя с постоянными магнитами типа YGT132S4 от относительного момента

Fig. 3. The dependence of the power factor of a synchronous motor with permanent magnets of the YGT132S4 type on the relative moment

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета энергетических показателей, которая позволяет определять потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности частотно-регулируемых синхронных электродвигателей при постоянном магнитном потоке.

2. Показано, что при уменьшении частоты питающего двигатель напряжения максимум коэффициента полезного действия смещается в сторону меньших нагрузок, практически сохраняя свою величину.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зиннер, Л. Я. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.
2. Овчинников, И. Е. Теория вентильных электрических двигателей / И. Е. Овчинников. Л.: Наука, 1985. 164 с.
3. Zawirski, K. Sterowanie Silnikiem Synchronicznym Magnesach Trwałych / K. Zawirski. Poznan: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2005. 179 p.
4. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины. Ч. 2. 2-е изд. переаб. и доп. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. М.: Высш. шк., 1987. 355 с.
6. Осин, И. Л. Электрические машины: синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.
7. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. Минск: Высш. шк., 2016. 159 с.
8. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 507–518. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518>.
9. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
10. Trzynadlowski, A. Control of Induction Motors / A. Trzynadlowski. London: Academic Press, 2001. 228 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-701510-1.x5000-4>.

Поступила 15.11.2017    Подписана в печать 19.03.2018    Опубликовано онлайн 27.07.2018

## REFERENCES

1. Zinner L. Ya., Skorospeshkin A. I. (1981) *Switched Induction DC and AC Motors*. Moscow, Energoizdat Publ. 136 (in Russian).
2. Ovchinnikov I. E. (1985) *The Theory of Switched Induction Electric Motors*. Leningrad, Nauka Publ. 164 (in Russian).
3. Zawirski K. (2005) *Sterowanie Silnikiem Synchronicznym Magnesach Trwałych*. Poznan, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. 179 (in Polish).
4. Firago B. I., Pawlaczuk L. B. (2006) *Regulated Alternative Current Drives*. Minsk, Technoperspektiva Publ. 363 (in Russian).
5. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V. S. (1987) *Electric Machines. Part 2*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 335 (in Russian).
6. Osin I. L., Shakaryan Yu. G. (1990) *Electric Machines: Synchronous Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
7. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) *Vector Systems Control of Electrical Drives*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).
8. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2016) The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 507–518 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518>.
9. Firago B. I., Pawlaczuk L. B. (2007) *The Theory of Electrical Drives*. Minsk, Technoperspektiva Publ. 585 (in Russian).
10. Trzynadlowski A. (2001) *Control of Induction Motors*. London, Academic Press. 228. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-701510-1.x5000-4>.

Received: 15 November 2017

Accepted: 19 March 2018

Published online: 27 July 2018