

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518

УДК 621.31.83.52

## Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного 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, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** С целью улучшения энергетических показателей и упрощения системы частотно-регулируемого электропривода расширяется область применения синхронных частотно-регулируемых электроприводов с независимым заданием частоты. Используются синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов в различных промышленных установках, включая грузоподъемные машины и механизмы. По сравнению с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами синхронные имеют меньшие потери мощности, жесткие механические характеристики без обратной связи по скорости, самый простой закон частотного управления – пропорциональный, который, однако, обеспечивает максимальный электромагнитный момент двигателя неизменным при всех частотах благодаря постоянному магнитному потоку. В статье рассмотрено аналитическое исследование переходных процессов синхронного электропривода с учетом влияния демпферной обмотки при линейном изменении частоты питающего напряжения в переходном процессе. В результате анализа получены формулы, позволяющие рассчитывать угловую скорость ротора и электромагнитный момент двигателя при пуске, торможении, набросе и сбросе нагрузки, оценивая качество переходного процесса и отслеживая максимальную величину электромагнитного момента, который не должен превышать допустимой величины. Подтверждение правильности разработанной методики расчета переходных процессов синхронного электропривода получено сопоставлением расчетов по формулам с результатами имитационного моделирования электропривода на основе синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6 кВ.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, частотное управление, демпферная обмотка, переходные процессы

**Для цитирования:** 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

## The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated 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.** In order to improve the power indices and to simplify the system of frequency speed control the scope of application of synchronous variable-frequency electric drives with independent

---

**Адрес для переписки**

Фираго Бронислав Иосифович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/11,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-61  
eapu@bntu.by

**Address for correspondence**

Firago Bronislav I.  
Belarusian National Technical University  
65/11 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-61  
eapu@bntu.by

---

frequency setting is being expanded. The synchronous motors with electromagnetic excitation and permanent magnet excitation in various industrial settings, including load-lifting machines and mechanisms, are used. As compared with the asynchronous frequency-regulated electric drives the synchronous ones have lower power loss, harder mechanical characteristic without feedback for speed and the simplest law of frequency control, i. e., a proportional one that, however, provides the maximum electromagnetic torque of the motor constant at all frequencies, due to the constant magnetic flux. The article concerns an analytical study of transient processes of synchronous electric drive with consideration of the influence of damping winding when the motor supply voltage frequency varies linearly during the transient time. As a result of the analysis the formulas have been obtained that make it possible to calculate the angular velocity of the rotor and the electromagnetic torque of the motor at start-up, braking, and impingement and discharge of loads, evaluating the quality of the transition process and tracking the maximum value of the electromagnetic torque, that must not exceed the permissible value. Validation of the developed technique of calculation of transient processes of synchronous electric drive has been obtained by comparison of calculations according to the formulas with the simulation results of the electric drive on the basis of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type (power of 500 kW and voltage of 6 kV).

**Keywords:** synchronous motor, frequency control, damping winding, transients

**For citation:** Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2016) The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 59 (6), 507–518 (in Russian)

### Введение

В настоящее время электромеханические процессы частотно-регулируемого асинхронного электропривода достаточно хорошо изучены и отражены в технической литературе [1, 2]. В значительно меньшей степени это сделано для частотного регулирования синхронных двигателей (СД). В то же время наблюдается расширение области применения синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) как для вентильных двигателей постоянного (БДПТ) и переменного (СДПМ) тока с зависимым частотным управлением (или, по-другому, с частотным регулированием с самосинхронизацией) [2–7], так и для частотного регулирования с независимым заданием частоты [8–10]. Поэтому представляет интерес рассмотреть переходные процессы синхронного электропривода при независимом задании частоты изменения питающего напряжения и наличии демпферной (пусковой) обмотки на роторе синхронного двигателя. Для возможности аналитического исследования переходных процессов синхронного электропривода линеаризована угловая характеристика СД и принят постоянным статический момент нагрузки. Из разнообразия законов плавного изменения частоты напряжения, а следовательно, угловой синхронной скорости СД в переходном процессе остановимся на линейном, который наиболее распространен на практике.

В статье представлен аналитический метод расчета переходных процессов синхронного электропривода с учетом влияния демпферной обмотки, расположенной на роторе. Сопоставление результатов аналитического расчета с результатами моделирования конкретного электропривода показывает правильность разработанной методики.

### Структурная схема и математическая модель линейризованного синхронного электропривода

При частотном управлении трехфазным СД при постоянном магнитном потоке максимальный синхронный момент можно записать в виде

$$M_{\text{син},m} = \frac{3U_1(\alpha)E_1(\alpha)}{\omega_0(\alpha)X_{1d}(\alpha)}, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} = \frac{\omega_1}{\omega_{1\text{ном}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0\text{ном}}}, \quad (2)$$

$\alpha$  – относительная частота изменения питающего напряжения;  $f_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_0$  – текущие значения частоты, угловой частоты и синхронной угловой скорости ротора;  $f_{1\text{ном}}$ ,  $\omega_{1\text{ном}}$ ,  $\omega_{0\text{ном}}$  – номинальные значения указанных выше величин;  $U_1$ ,  $E_1$  – соответственно действующие значения фазного напряжения и ЭДС взаимоиндукции;  $X_{1d}$  – индуктивное сопротивление по продольной оси машины.

Если учесть, что ЭДС взаимоиндукции  $E_1$ , синхронная угловая скорость  $\omega_0$  и индуктивное сопротивление  $X_{1d}$  по продольной оси линейно зависят от относительной частоты  $\alpha$ :

$$E_1 = E_{1\text{ном}}\alpha; \quad (3)$$

$$\omega_0 = \omega_{0\text{ном}}\alpha; \quad (4)$$

$$X_{1d} = X_{1d,\text{ном}}\alpha, \quad (5)$$

то, как следует из (1), максимальный синхронный момент СД будет сохраняться на номинальном уровне, равном

$$M_{\text{син},m} = \frac{3U_{1\text{ном}}E_{1\text{ном}}}{\omega_{0\text{ном}}X_{1d,\text{ном}}}, \quad (6)$$

если фазное напряжение статора  $U_1$  изменять пропорционально относительной частоте  $\alpha$ , т. е.

$$U_1 = U_{1\text{ном}}\alpha. \quad (7)$$

В (3)–(7) величины с индексом «ном» определены при номинальной частоте статора, т. е. при  $\alpha = 1$ .

При линеаризации угловой характеристики СД синхронный электромагнитный момент пропорционален углу рассогласования  $\theta$  в положении осей вращающегося магнитного поля статора и магнитного поля ротора

$$M_{\text{син}} = \frac{M_{\text{ном}}}{\theta_{\text{ном}}}\theta = b\theta, \quad (8)$$

где  $b$  – магнитная жесткость СД, обусловленная упругой связью ротора с вращающимся магнитным полем,  $b = \frac{M_{\text{ном}}}{\theta_{\text{ном}}}$ .

Магнитная жесткость СД аналогична упругой жесткости  $c$  в механической передаче при упругой угловой деформации  $\Delta\varphi$ , которая создает упругий момент

$$M_y = c\Delta\varphi.$$

Заметим, что магнитная и механическая жесткости имеют одинаковую размерность: Н·м/рад.

Угол рассогласования в положении магнитных осей статора и ротора, который еще называется углом нагрузки, определяется интегралом

$$\theta = \int (\omega_0 - \omega) dt,$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega$  – текущие значения угловой скорости магнитного поля и ротора СД.

При наличии демпферной обмотки на роторе СД в переходном процессе возникает асинхронный момент  $M_{ac}$ , пропорциональный отклонению угловой скорости ротора  $\omega$  от угловой скорости магнитного поля  $\omega_0$ :

$$M_{ac} = \beta(\omega_0 - \omega),$$

где  $\beta$  – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики, создаваемой демпферной (пусковой) обмоткой СД,  $\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0ном} s_k}$ ;  $M_k$ ,  $s_k$  – критический момент и критическое скольжение указанной линеаризованной механической характеристики.

Поскольку в рассматриваемом частотном управлении СД магнитный поток остается неизменным, то модуль жесткости  $\beta$  линеаризованной механической характеристики будет постоянным при всех частотах.

В переходном процессе суммарный момент синхронного двигателя будет состоять из суммы

$$M = M_{син} + M_{ac} = b \int (\omega_0 - \omega) dt + \beta(\omega_0 - \omega). \quad (9)$$

Добавляем к (9) уравнение движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (10)$$

где  $J$  – момент инерции электропривода, который принимается постоянным;  $M_c$  – статический момент, также принимаемый неизменным.

Запишем (9) и (10) в операторной форме:

$$M(p) = \left( \beta + \frac{b}{p} \right) [\omega_0(p) - \omega(p)]; \quad (11)$$

$$p\omega(p) = \frac{1}{J} [M(p) - M_c(p)]. \quad (12)$$

Выражениям (11), (12) соответствует структурная схема на рис. 1.

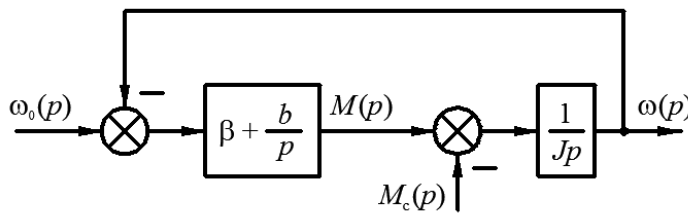


Рис. 1. Структурная схема линейризованного синхронного электропривода  
 Fig. 1. Structural diagram of linearized synchronous electric drive

Исследуем переходный процесс синхронного электропривода при линейном изменении частоты  $f_1$  питающего напряжения, а следовательно, и линейном изменении угловой скорости магнитного поля

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t + \omega_{0\text{нач}},$$

где  $\varepsilon_0$  – задаваемое угловое ускорение магнитного поля;  $\omega_{0\text{нач}}$  – начальная угловая скорость магнитного поля.

Математическую модель рассматриваемого синхронного электропривода при принятых допущениях можно представить системой уравнений:

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t + \omega_{0\text{нач}};$$

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) + b \int (\omega_0 - \omega) dt; \quad (13)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

#### Аналитическое исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода

На основании математической модели (13) можно получить дифференциальное уравнение для угловой скорости  $\omega$  ротора синхронного двигателя

$$T_M \tau \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \tau \frac{d\omega}{dt} + \omega = a + \varepsilon_0 t, \quad (14)$$

где  $a = \varepsilon_0 \tau + \omega_{0\text{нач}} = \text{const}$ ;  $T_M = \frac{J}{\beta}$ ;  $\tau = \frac{\beta}{b}$ ;  $T_M, \tau$  – постоянные времени.

Преобразуя (14) с учетом (13), находим дифференциальное уравнение для электромагнитного момента синхронного двигателя

$$T_M \tau \frac{d^2 M}{dt^2} + \tau \frac{dM}{dt} + M = M_c + M_{\text{дин},0}, \quad (15)$$

где  $M_{\text{дин},0}$  – задаваемый динамический момент в переходном процессе,  $M_{\text{дин},0} = J \varepsilon_0$ .

Для дифференциальных уравнений (14) и (15) имеем одно характеристическое выражение

$$T_M \tau p^2 + \tau p + 1 = 0 \quad (16)$$

с корнями

$$p_{1,2} = -\zeta \pm \frac{\sqrt{m(m-4)}}{2\tau},$$

где  $\zeta = \frac{1}{2T_M}$  – коэффициент затухания;  $m = \frac{\tau}{T_M}$  – отношение постоянных времени.

При  $m < 4$  получаем комплексно сопряженные корни

$$p_{1,2} = -\zeta \pm j\Omega_p,$$

где  $\Omega_p$  – резонансная частота колебаний,

$$\Omega_p = \frac{\sqrt{m(4-m)}}{2\tau};$$

$$\Omega_p = \sqrt{\Omega_0^2 - \zeta^2};$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{b}{J}} = \frac{1}{\sqrt{T_M \tau}},$$

$\Omega_0$  – собственная частота электромеханических колебаний синхронного электропривода.

Для дифференциального уравнения (14) можно записать общее решение в виде

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 t + e^{-\zeta t} (A e^{j\Omega_p t} + B e^{-j\Omega_p t}), \quad (17)$$

где  $A, B$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$\omega(t=0) = \omega_{\text{нач}};$$

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{J} = \varepsilon_{\text{нач}}.$$

Используем эти начальные условия для (17) и найдем постоянные интегрирования  $A$  и  $B$ , которые после подстановки в (17) и необходимых преобразований позволяют получить окончательное выражение для угловой скорости синхронного двигателя в переходном процессе

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 t + e^{-\zeta t} \left[ \Delta\omega_{\text{нач}} \cos(\Omega_p t) + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}} + \zeta \Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right], \quad (18)$$

где  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}} - \omega_{\text{нач}}$ .

Для дифференциального уравнения (15) начальные условия будут следующими:

$$M(t=0) = M_{\text{нач}};$$

$$\left. \frac{dM}{dt} \right|_{t=0} = b[\tau(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}}) - \Delta\omega_{\text{нач}}]. \quad (19)$$

Используя (19) совместно с (14) для нахождения решения уравнения (15), после преобразований получаем выражение для электромагнитного момента синхронного двигателя в переходном процессе

$$M = M_c + M_{\text{дин},0} + e^{-\zeta t} \left[ (M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta(M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) + \beta(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}}) + b\Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right]. \quad (20)$$

Далее исследуем пуск электропривода при наличии статического момента  $M_c > 0$ . Пусть  $\omega_{0\text{нач}} = 0$ , тогда

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t.$$

При  $M < M_c$  угловая скорость  $\omega = 0$  и электромагнитный момент двигателя изменяются по закону

$$M = \beta\varepsilon_0 \tau t + b\varepsilon_0 \frac{t^2}{2} = b\varepsilon_0 t \left( \tau + \frac{t}{2} \right).$$

Из этого выражения при  $M = M_c$  находим время задержки движения

$$t_3 = -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2M_c}{b\varepsilon_0}}.$$

Следовательно, при наличии статического момента время разгона электропривода разбивается на три этапа. Первый этап пуска электропривода определяется соотношениями:  $0 \leq t \leq t_3$ ;  $\omega = 0$ ;  $M < M_c$

$$M = b\varepsilon_0 t \left( \tau + \frac{t}{2} \right).$$

Временные границы второго этапа находятся в пределах

$$t_3 \leq t \leq t_0,$$

где  $t_0$  – время линейного изменения угловой скорости  $\omega_0$  магнитного поля при заданной величине углового ускорения  $\varepsilon_0$  и конечном значении угловой скорости  $\omega_{\text{окон}}$  магнитного поля,  $t_0 = \frac{\omega_{\text{окон}}}{\varepsilon_0}$ .

На втором этапе удобнее перенести начало отсчета времени на начало движения ротора, тогда новое время будет определяться выражением

$$t' = t - t_3,$$

при этом  $t' = t_0 - t_3$ , а временной интервал:  $0 \leq t' \leq t'_0$ .

Для второго этапа имеем начальные условия:  $M_{\text{нач}} = M_c$ ;  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ;  $\varepsilon_{\text{нач}} = 0$ ;  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}}(t') - \omega = \omega_{0\text{нач}}(t) = \varepsilon_0 t_3$ .

С учетом этих начальных условий из (18) получаем уравнение для угловой скорости ротора на втором этапе разгона

$$\omega(t') = \varepsilon_0(t_3 + t') - e^{-\zeta t'} \left[ \varepsilon_0 t_3 \cos(\Omega_p t') + \frac{\varepsilon_0(1 + \zeta t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t') \right].$$

Для электромагнитного момента двигателя на втором этапе разгона находим следующее уравнение:

$$M(t') = M_c + M_{\text{дин},0} - e^{-\zeta t'} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t') + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - b\varepsilon_0(\tau + t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t') \right].$$

В конце второго этапа разгона электропривода определяем значения:

- времени  $t' = t'_0 = t_0 - t_3$ ;
- угловой скорости ротора

$$\omega(t'_0) = \omega_{\text{окон}} - e^{-\zeta t'_0} \left[ \varepsilon_0 t_3 \cos(\Omega_p t'_0) + \frac{\varepsilon_0(1 + \zeta t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'_0) \right]; \quad (21)$$

- электромагнитного момента

$$M(t'_0) = M_c + M_{\text{дин},0} - e^{-\zeta t'_0} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t'_0) + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - b\varepsilon_0(\tau + t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'_0) \right]. \quad (22)$$

Как следует из (21) и (22), в конце второго этапа разгона электропривода еще не наступает установившийся режим работы. Поэтому будет третий этап разгона, когда угловая скорость магнитного поля достигает своего конечного значения

$$\omega_0(t_0) = \omega_{\text{окон}} = \text{const},$$

но начальные условия для этого переходного процесса не нулевые.



В связи с тем что в конце второго и начале третьего этапа разгона заданное угловое ускорение магнитного поля  $\varepsilon_0$  скачком изменяется от конечного до нулевого значения, формулы (18) и (20) уже нельзя использовать для дальнейшего анализа переходного процесса на третьем этапе разгона. В [2] приводится уравнение (10.210) для угловой скорости синхронного электродвигателя при  $\omega_0 = \text{const}$  и ненулевых начальных условиях, которым мы и воспользуемся. В этом уравнении обозначено

$$\Delta\omega_0 = \omega_0 - \omega_{\text{нач}},$$

что для начальных условий третьего этапа соответствует выражению

$$\Delta\omega_0 = \omega_{0\text{кон}} - \omega(t'_0).$$

Принимая во внимание обозначение времени на третьем этапе как

$$t'' = t - t_0, \quad 0 \leq t'' \leq (6 \div 8)T_M,$$

записываем уравнение угловой скорости синхронного двигателя на этом этапе разгона

$$\omega(t'') = \omega_{0\text{кон}} - e^{-\zeta t''} \left[ \Delta\omega_0 \cos(\Omega_p t'') - \frac{\Omega_0^2 (\theta_{\text{нач}} - \theta_c) + \zeta \Delta\omega_0 \sin(\Omega_p t'')}{\Omega_p} \right], \quad (23)$$

где  $\theta_{\text{нач}}$ ,  $\theta_c$  – соответственно начальный и статический углы нагрузки синхронного двигателя для третьего этапа разгона.

С учетом того, что в конце второго этапа разгона можно принять  $e^{-\zeta t'_0} \approx 0$ , так как  $t'_0 > 6T_M$ , начальный угол нагрузки можно определить как

$$\theta_{\text{нач}} = \frac{M(t'_0)}{b} = \frac{M_c + M_{\text{дин},0}}{b}.$$

Тогда

$$\theta_{\text{нач}} - \theta_c = \frac{M_{\text{дин},0}}{b}.$$

По указанной выше причине электромагнитный момент синхронного двигателя на третьем этапе разгона будет рассчитываться исходя из уравнения движения

$$M(t'') = M_c + J \frac{d\omega(t'')}{dt''}. \quad (24)$$

Взяв производную по времени  $t''$  от (23) и подставив в (24), после преобразований получаем уравнение для электромагнитного момента синхронного двигателя на третьем этапе разгона электропривода

$$M(t'') = M_c + e^{-\zeta t''} \left[ (M_{\text{дин},0} + \beta \Delta\omega_0) \cos(\Omega_p t'') - \frac{b \Delta\omega_0 - \zeta M_{\text{дин},0}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'') \right].$$

Торможение синхронного электропривода рассмотрим при линейном снижении частоты питающего напряжения с установившегося состояния, принимая во внимание начальные условия  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}} - \omega_{\text{нач}} = 0$ , так как  $\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}}$ ;  $M_{\text{нач}} = M_c$ , и соотношения  $\varepsilon_0 < 0$ ;  $M_{\text{дин},0} = J\varepsilon_0 < 0$ .

При торможении угловая скорость магнитного поля уменьшается по линейному закону  $\omega_0 = \omega_{0\text{нач}} - \varepsilon_0 t$ , а начальное угловое ускорение

$$\varepsilon_{\text{нач}} = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{J} = 0.$$

Используя эти данные в (18), находим выражение для угловой скорости двигателя

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} - \varepsilon_0 t + \frac{\varepsilon_0}{\Omega_p} e^{-\zeta t} \sin(\Omega_p t).$$

Начальные условия переходного процесса при торможении электропривода с установившегося состояния, учтенные в (20), позволяют найти уравнение для электромагнитного момента двигателя

$$M = M_c - M_{\text{дин},0} + e^{-\zeta t} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - \beta \varepsilon_0}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right].$$

Если  $M_c > |M_{\text{дин},0}|$ , то при реактивном статическом моменте торможение электропривода заканчивается, когда скорость двигателя достигает нулевого значения.

Для иллюстрации теоретических исследований проведены расчеты по полученным формулам, результаты которых сопоставлены с результатами компьютерного моделирования электропривода с синхронным двигателем типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6000 В при коэффициенте инерции  $K_J = 4$ , относительном статическом моменте  $\mu_c = 0,4$  и времени линейного изменения угловой скорости магнитного поля  $t_0 = 10$  с (рис. 2), а также при набросе нагрузки от  $\mu_c = 0,4$  до  $\mu_c = 1,0$  (рис. 3).

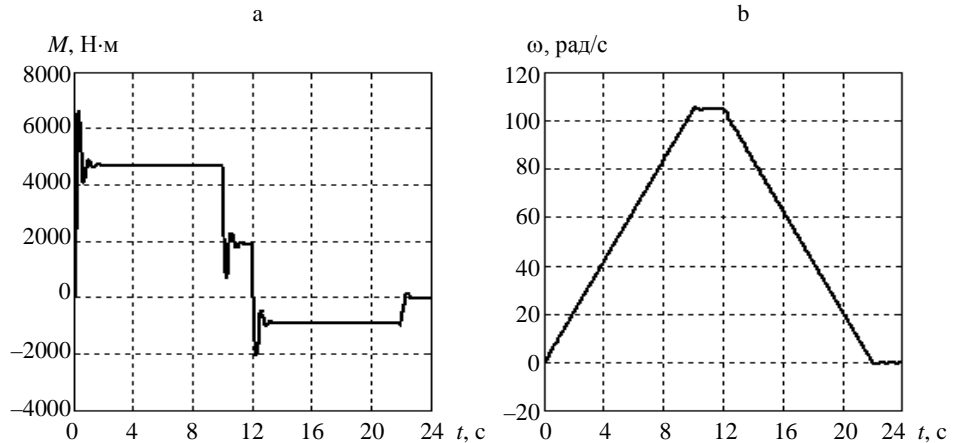


Рис. 2. Переходные процессы при разгоне и торможении синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 при линейном изменении частоты питающего напряжения: а – электромагнитный момент; б – угловая скорость двигателя

Fig. 2. Transients during acceleration and braking of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type with a linear change of frequency of supplying voltage: а – electromagnetic torque; б – motor angular velocity

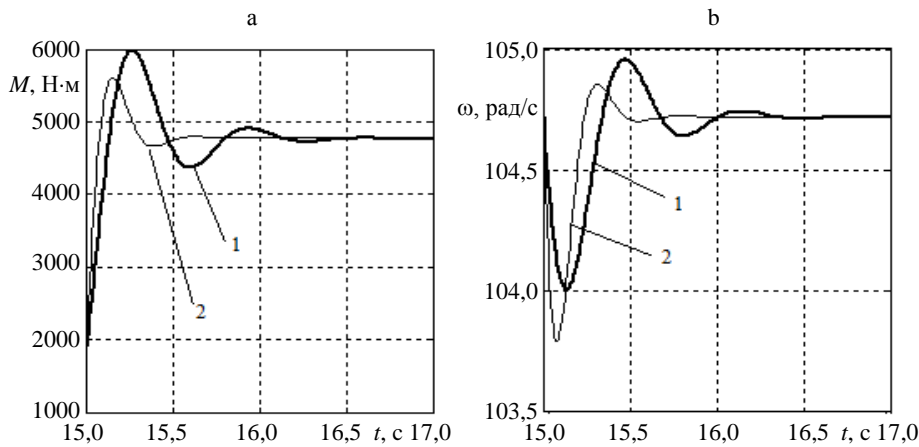


Рис. 3. Переходные процессы синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 при набросе нагрузки от  $\mu_c = 0,4$  до  $\mu_c = 1,0$ : а – электромагнитный момент; б – угловая скорость двигателя; 1 –  $K_J = 4$ ; 2 –  $K_J = 1,6$

Fig. 3. Transients of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type the type synchronous motor when impingement of loads from  $\mu_c = 0.4$  to  $\mu_c = 1.0$ : а – electromagnetic torque; б – rotor angular velocity; 1 – factor of inertia  $K_J = 4$ ; 2 –  $K_J = 1.6$

### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода при линейном изменении частоты напряжения и учете влияния демпферной обмотки.

2. Сопоставление результатов аналитического расчета с результатами имитационного моделирования электропривода с синхронным двигателем типа СДЗ 13-34-6 (мощность 500 кВт, напряжение 6 кВ) показало, что результаты совпадают.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 1998. 172 с.
2. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
3. Зиннер, Л. Я. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.
4. Овчинников, И. Е. Теория вентильных электрических двигателей / И. Е. Овчинников. Л.: Наука, 1985. 164 с.
5. Мохсен, А. Перспективный электропривод мостовых кранов / А. Мохсен // Электромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації: зб. наук. праць VI Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук, КДПУ, 2008. С. 57–61.
6. Бешта, О. С. Обґрунтування доцільності використання синхронних двигунів з постійними магнітами з вбудованими магнітами / О. С. Бешта, О. В. Балахонцев, С. Г. Фурса // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. 2010. № 4 (63), Ч. 2. С. 73–75.

7. Толочко, О. І. Особенности векторного керування синхронними двигунами при врахуванні втрат у сталі / О. І. Толочко, В. В. Божко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика. 2012. № 3 (19). С. 45–47.
8. Брусин, Д. Э. Электрические машины / Д. Э. Брусин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. Ч. 2. 355 с.
9. Осин, И. Л. Электрические машины: синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.
10. Jakubec, M. Energooszczednosc i Kompatybilnosc w Napedach Elektrycznych / M. Jakubec. Katowice, 2005. 134 p.

Поступила 21.06.2016 Подписана в печать 22.08.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Pozdeev A. D. (1998) *Electromagnetic and Electromechanical Processes in Frequency Controlled Asynchronous Electric Motor Drives*. Cheboksary: Chuvash University Publ. 172 (in Russian).
2. Firago B. I., Pawlaczyk L. B. (2006) *Regulated Alternative Current Electric Drives*. Minsk, Technoperspectiva Publ. 363 (in Russian).
3. Zimmer L. Ya., Skorospeshkin A. I. (1981) *DC and AC Valve Motors*. Moscow, Energoizdat Publ. 136 (in Russian).
4. Ovchinnikov I. E. (1985) *Theory of Valve Electric Motors*. Leningrad, Nauka. 164 (in Russian).
5. Mohsen A. (2008) Promising Electrical Drive for Bridge Cranes. *Elektromekhanichni Sistemi, Metody Modeliuvannia ta Optimizatsii. Zbirnik Naukovikh Prats VI Vseukraïnskoï Naukovo-Tekhnichnoï Konferentsii Molodikh Uchenikh i Spetsialistiv* [Electromechanical Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference Proceedings of the VI Science and Technical Conference of Beginners in Science and Industry]. Kremenchuk, KPSU, 57–61 (in Russian).
6. Beshta A. S., Balahontsev A. V., Fursa S. G. (2010) Ground of Expedience of the Use of Synchronous Engines with Permanent Magnets with Built-In Magnets. *Visnik Kremenchutskogo Derzhavnogo Universitetu Imeni Mikhaïla Ostrogradskogo* [Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University], (63) 4, part 2, 73–75 (in Ukrainian).
7. Tolochko O. I., Bozhko V. V. (2012) Features of Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Taking into Account Core Losses. *Elektromekhanichni i Energozberegaiuchi Sistemi. Tematichnii Vipusk "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriia i Praktika"* [Electromechanical and Energy Saving System. Thematic issue "Problems of Automated Electric Drive: Theory and Applications"], 19 (3), 45–47 (in Ukrainian).
8. Bruskin D. E., Zorochovich A. E., Hvostov V. S. (1987) *Electric Machines. Part 2*. Moscow, Vysshaya Shkola. 355 (in Russian).
9. Osin I. L., Shakarian Yu. G. (1990) *Electric Machines: Synchronous Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 304 (in Russian).
10. Jakubec M. (2005) *Energooszczednosc i Kompatybilnosc w Napedach Elektrycznych* [Energy Saving and Compatibility in Electrical Drives]. Katowice, Komel. 134 (in Polish).

Received: 21 June 2016

Accepted: 22 August 2016

Published online: 29 November 2016