СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин / Под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
4. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
5. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 176 с.
6. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

Поступила 15.03.2009 г.

УДК 621.313.333

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

А.В. Аристов, Н.А. Воронина

Томский политехнический университет
E-mail: Parist@sibmail.com

Предложена методика определения частотных, механических и регулировочных характеристик электропривода колебательного движения, работающего в шаговом режиме. Определены условия автономности по координате, скорости и моменту, а также условия пропорционального регулирования кинематических и силовых характеристик электропривода.

Ключевые слова:
Электропривод колебательного движения, рабочие характеристики, шаговый режим, автономность регулирования.

В работе [1] были рассмотрены функциональная схема и принципы работы электропривода колебательного движения, работающего в режиме прерывистого движения за счет импульсного питания одной из обмоток статора исполнительного двигателя. Как показывает многолетняя практика, технические требования к таким электроприводам развиваются в первую очередь по пути повышения управляемости, что требует при их проектировании простых расчетных инженерных соотношений и характеристик, взаимосвязывающих функции регулирования, нагрузку и выходные параметры системы. Решению данных вопросов и посвящена данная статья.

Основные свойства электропривода колебательного движения, работающего в режиме прерывистого движения, будут определяться рядом его характеристик. В первую очередь к ним относятся: амплитудные кинематические и силовые, регулировочные и механические характеристики. Для их определения и анализа необходимо решить систему уравнений, описывающих электромеханический преобразователь энергии [2] при фазных напряжениях статора $U_{\alpha s}$, $U_{\beta s}$ в системе координатных осей α, β, имеющих вид

$$U_{\alpha s}(t) = \\ = U_m\gamma_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}\sin(\omega_1 t+\alpha)+ \\ +\frac{1}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)[\cos[(\omega_1-(2i-1)\Omega)t+\alpha]- \\ -\cos[(\omega_1-(2i-1)\Omega)t+\alpha]] \end{array} \right\};$$

$$U_{\beta s}(t) = U_m\gamma_2\sin(\omega_2 t+\beta),$$

где U_m – амплитудное значение питающих фазных напряжений обмоток статора; γ_1, γ_2 – коэффициенты сигналов; ω_1, ω_2, α, β – круговые частоты и начальные фазы фазных напряжений; $\Omega=\omega_1-\omega_2$ – круговая частота шага.

Полагая, что частота Ω на порядок меньше частоты питающей сети ω_1, ω_2 и переходя к операторной форме записи, решение системы для установившегося режима работы с помощью корней характеристических уравнений функций регулирования $p_{1,2}=\pm j\omega_1$; $p_{3,4}=\pm j\omega_2$; $p_{5,6i}=\pm j(\omega_1-(2i-1)\Omega$; $p_{7,8i}=\pm j(\omega_1+(2i-1)\Omega$ для n-го тока во временной плоскости будет иметь вид

$$i_n(t)=$$

$$=(-1)^{n+1}U_m\gamma_1\{\frac{\Delta_{1n}(j\omega_1)}{4j\Delta(j\omega_1)}[\cos(\omega_1 t+\alpha)+j\sin(\omega_1+\alpha)]-$$

$$[-j\omega_1)]^*+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)\{\frac{\Delta_{1n}(j[\omega_1-(2i-1)\Omega])}{2j\Delta(j[\omega_1-(2i-1)\Omega])}\times$$

$$\times[\cos([\omega_1-(2i-1)\Omega]t+\alpha)+$$

$$+j\sin([\omega_1-(2i-1)\Omega]t+\alpha)]-$$

$$-[-j[\omega_1-(2i-1)\Omega]]^*-\frac{\Delta_{1n}(j[\omega_1+(2i-1)\Omega])}{2j\Delta(j[\omega_1+(2i-1)\Omega])}\times$$

$$\times[\cos([\omega_1+(2i-1)\Omega]t+\alpha)+$$

$$+j\sin([\omega_1+(2i-1)\Omega]t+\alpha)]+$$

$$+[-j[\omega_1+(2i-1)\Omega]]^*\}\}+(-1)^n U_m\gamma_2\{\frac{\Delta_{2n}(j\omega_2)}{2j\Delta(j\omega_2)}\times$$

$$\times[\cos(\omega_2 t+\alpha)+j\sin(\omega_2+\alpha)]-[-j\omega_2)]^*\},$$

где $\Delta_{ln}(\ )$ – минор элемента l-й строки и n-го столбца определителя системы уравнений электромеханического преобразователя энергии; $\Delta(\ )$ – детерминант четвертого порядка системы; n=1, 2, 3, 4; фазные токи обмоток статора (s) и ротора (r): $i_1(t)=i_{\alpha s}$; $i_2(t)=i_{\beta s}$; $i_3(t)=i_{\alpha r}$; $i_4(t)=i_{\beta r}$; символом $[\ ]^*$ обозначены слагаемые, комплексно-сопряженные предыдущим величинам.

Раскрыв определители и свернув комплексно-сопряженные выражения, значения фазных токов можно записать как

$$i_n(t)=(-1)^{n+1}U_m\gamma_1\{T_{1n}\sin(\omega_1 t+\theta_{1n})+$$

$$+\frac{1}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)[T_{2ni}\sin[(\omega_1-(2i-1)\Omega)t+\theta_{2ni}]-$$

$$-T_{3ni}\sin[(\omega_1+(2i-1)\Omega)t+\theta_{3ni}]]\}+$$

$$+(-1)^n U_m\gamma_2 T_{4n}\sin(\omega_2 t+\theta_{4n}),$$

где коэффициенты T_{in}, и фазовые углы θ_{in} определяются параметрами электрической машины.

Шаговая составляющая колебательного электромагнитного момента определяется согласно [3] из решения уравнения

$$M_{\text{эм}}(t)=L_m(i_{\alpha s}i_{\beta r}-i_{\beta s}i_{\alpha r}),$$

где L_m – полная взаимоиндуктивность электрической машины.

Разложив исходное выражение в ряд Маклорена по степеням скорости ω (в окрестности точки ω=0) и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, а также учитывая, что глубина модуляции периодических коэффициентов демпфирующей составляющей момента при низких частотах обычно невелика, можно записать

$$M_{\text{эм}}(t)=M_1\sin[\Omega t+\Psi_1]+M_2\sin[(\omega_1+\omega_2)t+\Psi_2]+$$

$$+\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)\{M_{3i}\sin[2i\Omega t+\Psi_{3i}]+$$

$$+M_{4i}[(\omega_1+\omega_2-(2i-1)\Omega)t+\Psi_{4i}]+$$

$$+M_{5i}\sin[(\omega_1+\omega_2+(2i-1)\Omega)t+\Psi_{5i}]\}+$$

$$+\left(N_0+\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)^2N_i\right)\frac{d\chi}{dt}. \qquad (1)$$

Здесь M_i, N_i, Ψ_i – величины, определяемые произведениями фазных токов и их производных по скорости ω. Тогда координата подвижного элемента двигателя $\chi(t)$ определится из решения уравнения движения электромеханического преобразователя энергии

$$L_{\text{мех}}\frac{d^2\chi}{dt}+R_{\text{мех}}\frac{d\chi}{dt}=M_{\text{эм}}(t), \qquad (2)$$

как

$$\chi(t)=\chi_{m1}\sin[\Omega t+\sin\psi_1]+$$

$$+\chi_{m2}\sin[(\omega_1+\omega_2)t+\psi_2]+$$

$$+\sum_{i=1}^{\infty}(2i-1)\{\chi_{m3i}\sin[2i\Omega t+\psi_{3i}]+$$

$$+\chi_{m4i}[(\omega_1+\omega_2-(2i-1)\Omega)t+\psi_{4i}]+$$

$$+\chi_{m5i}\sin[(\omega_1+\omega_2+(2i-1)\Omega)t+\psi_{5i}]\}, \qquad (3)$$

где $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$ – коэффициенты инерционной и демпфирующей сил нагрузки; χ_{mj}, ψ_{ji} – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих закона движения.

Исходное выражение (1, 3) является определяющим для описания рабочих характеристик электродвигателя колебательного движения, работающего в шаговом режиме. Однако, они весьма громоздки и требуют при своем анализе большого объема вычислений, что делает затруднительным применение их для получения практических выводов. Поэтому, с целью наглядности и простоты, исследования влияния параметров нагрузки и источников питания на рабочие характеристики электропривода колебательного движения при шаговом режиме работы будут проводиться в дальнейшем применительно к какому-либо конкретно выполненному асинхронному двигателю. Так как все расчеты и построения будут вестись в относительных единицах, то выводы будут иметь вполне общий характер и общее значение.

Кроме того, целесообразно использовать ряд упрощающих допущений, в частности:

- рассматривать установившиеся режимы работы исполнительного двигателя, когда величина шага подвижного элемента не превышает половины геометрического базового размера положения ротора обобщенного электродвигателя;
- если закон движения подвижного элемента электродвигателя не имеет определяющего значения, то находить рабочие характеристики для первой гармоники;
- считать параметры нагрузки в процессе работы постоянными и независящими от времени;
- при необходимости определять отклонение выходных параметров относительными или среднеквадратичными величинами.

С учетом вышесказанного и выражений (2, 3) амплитуда первой гармоники координаты движения χ_{m1} и ее фаза α запишутся как

$$\chi_{m1} = \frac{M_1}{\Omega(R_{\text{мех}} - f_{\text{демп}})\sqrt{1+Z(\Omega)^2}};$$

$$\psi_1 = \mathrm{arctg}\frac{\sin\Psi_1 L_{\text{мех}}\Omega - \cos\Psi_1(R_{\text{мех}} - f_{\text{демп}})\Omega}{\cos\Psi_1 L_{\text{мех}}\Omega + \sin\Psi_1(R_{\text{мех}} - f_{\text{демп}})\Omega}, \qquad (4)$$

где $f_{\text{демп}} = N_0 + \sum\limits_{i=1}^{\infty}(2i-1)^2 N_i$ – суммарный коэффициент электромагнитного демпфирования двигателя; $Z(\Omega)=L_{\text{мех}}\Omega/(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})$ – электромеханическая постоянная времени, а первая гармоника шаговой составляющей колебательного электромагнитного усилия

$$M_{\text{эм},1}(t) = M_m \cdot \sin(\Omega t + \theta).$$

Здесь амплитуда M_m и фаза θ определяются выражениями

$$M_m = M_1\left[\frac{R_{\text{мех}}{}^2 + L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2}{(R_{\text{мех}} - f_{\text{демп}})^2(1+Z(\Omega)^2)}\right]^{0,5};$$

$$\theta = \psi_1 + \mathrm{arctg}\frac{1}{Z(\Omega)}. \qquad (5)$$

Полученные соотношения (4, 5) описывают искомые амплитудные кинематические $\chi_m(\Omega)$, $\omega_m(\Omega)$ и силовые $M_m(\Omega)$ характеристики, а также механические амплитудные (Ω=var) и мгновенные (t=var) характеристики по координате $\chi_m(M_m)$; $\chi(M_{\text{эм}})$ и скорости $\omega_m(M_m)$; $\omega(M_{\text{эм}})$ для различных видов нагрузки. Представленные соотношения определяют и всю гамму регулировочных характеристик $\chi_m(\gamma_i, \Omega)$, $\omega_m(\gamma_i, \Omega)$, $M_m(\gamma_i, \Omega)$ при подстановке в них зависимостей M_1 и $f_{\text{демп}}$ от функций регулирования.

На рис. 1. приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вибротранспортной технологической установки горизонтального снаряжения трубчатых изделий, выполненной на базе асинхронного двигателя типа 4АК160S8У3. Так как представленные кривые иллюстрируют формирование шагового режима работы двигателя при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы, то последнее и предопределяет в конечном итоге характер АЧХ. Однако, следует сразу заметить, что приведенная амплитудно-частотная силовая характеристика отличается от известной [4], так как построена с учетом механического демпфирования нагрузки. В частности она имеет хотя и слабый, но возрастающий характер. Этот факт позволяет заключить о возможности синтезировать для некоторого частотного диапазона силовой электропривод прерывистого движения, инвариантный по усилию к частоте шага.

Амплитудные механические характеристики можно определить из решения системы

$$\begin{cases} \chi(t) = \chi_m \sin(\Omega t + \psi); \\ M_{\text{эм}}(t) = M_m \sin\left(\Omega t + \psi + \mathrm{arctg}\dfrac{1}{Z(\Omega)}\right). \end{cases}$$

Они представляют собой не замкнутые кривые, а абсолютные мгновенные (рис. 2) – эллипсы $\omega(M_{\text{эм}})$ и полуэллипсы $\chi(M_{\text{эм}})$. Они построены для одного шагового движения и не учитывают, как уже отмечалось, высокочастотных составляющих суммарной частоты $\omega_1+\omega_2$.

Независимо от режима работы асинхронного двигателя кривые занимают первый квадрант, кроме того, мгновенные механические характеристики по скорости повернуты относительно начала координат на угол

$$\alpha_{\text{эл}} = 0,5\mathrm{arctg}\frac{4M_m\omega_m}{M_m^2 - \omega_m^2}\sqrt{1+Z(\Omega)^2}.$$

В отличие от амплитудных механических характеристик и абсолютных мгновенных – относительные мгновенные механические характеристики представляют собой нагрузочные линии при колебательном режиме работы асинхронного двигателя и не связаны с его параметрами, что принципиально отличает их от эллиптических характеристик, используемых в работе [5].

Регулировочные характеристики наряду с механическими являются основными характеристиками исполнительных двигателей, работающих в режиме прерывистого движения. Одним из главных

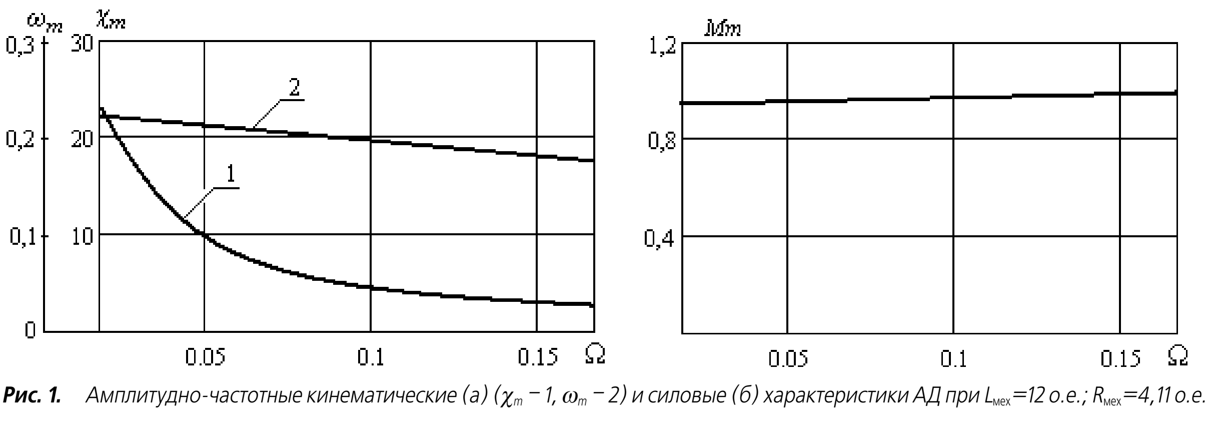

Рис. 1. *Амплитудно-частотные кинематические (а) (χ_m – 1, ω_m – 2) и силовые (б) характеристики АД при $L_{\text{мех}}$=12 о.е.; $R_{\text{мех}}$=4,11 о.е.*

требований, предъявляемым к ним, является линейность – прямая пропорциональность выходных параметров машины от функций регулирования. Однако, как правило, это требование не выполняется. В первую очередь это связано с тем, что составляющие пускового M_i и демпфирующего $f_{демп}$ усилия, определяющие в конечном итоге характер изменения выходных параметров исполнительного двигателя, являются нелинейными функциями от коэффициента сигнала управления γ_i.

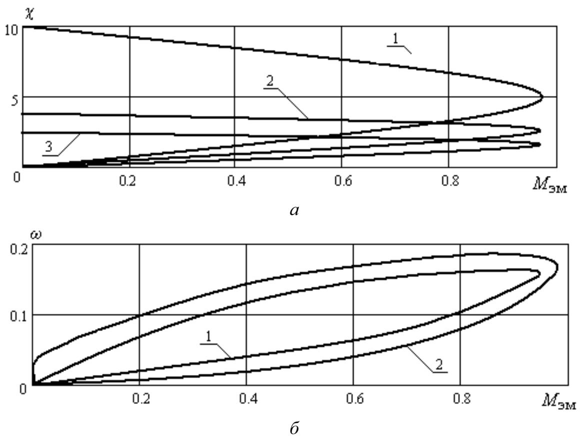

Рис. 2. *Мгновенные абсолютные механические характеристики асинхронного двигателя по координате (а) и скорости (б) при $L_{мех}$=12 о.е.; $R_{мех}$=4,11 о.е.; Ω=0,02 о.е. (1), Ω=0,18 о.е. (2) Ω=0,1 о.е. (3)*

Причем нелинейность составляющих электромагнитного усилия зависит существенным образом от того, как и по каким из обмоток исполнительного двигателя производится регулирование.

Во-вторых, выходные параметры, характеризующие кинематические и силовые характеристики электродвигателя колебательного движения в режиме прерывистого движения, в свою очередь, сами являются нелинейными функциями от M_i и $f_{демп}$.

В таблице представлены способы регулирования асинхронного двигателя при шаговом движении, а на рис. 3 соответствующие им законы изменения $\chi_m(\gamma)$ и $M_m(\gamma)$ для рассматриваемого ранее двигателя на частоте шага Ω=0,057 о.е. В них $G_1..G_3$ – определяются параметрами электрической машины.

Представленные характеристики представляют практический интерес, так как иллюстрируют возможность пропорционального регулирования величины шага и момента при изменении фазного напряжения, например, по одной из обмоток двигателя (кривая 1).

Условия автономности регулирования кинематических и силовых параметров при шаговом движении ротора двигателя представлены в таблице. Они взаимосвязывают частоту шага Ω с функциями регулирования через электромагнитный пусковой и демпфирующие моменты для произвольно заданных значений амплитуды χ_m, скорости ω_m, и усилия M_m.

В частности, на рис. 4 представлены характеристики $\Omega(\gamma)$ при обеспечение постоянства амплитуды шага χ_m для двух заданных уровней. Анализ характеристик позволяет констатировать факт о возможности обеспечения постоянства амплитуды шага за счет линейного регулирования одного из фазных напряжений двигателя (кривые 2, 4).

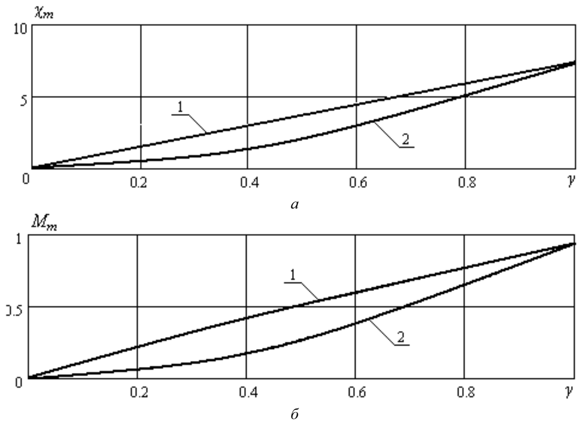

Рис. 3. *Законы регулирования амплитуд закона движения (а) и электромагнитного момента (б) при γ_1 – var, γ_2=1 (1); γ_1=γ_2 – var (2)*

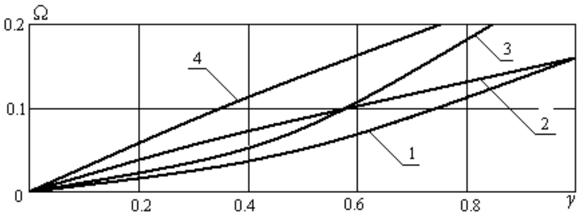

Рис. 4. *Условие автономности регулирования амплитуды координаты при χ_m=2,47 о.е. (1,2), χ_m=1,5 о.е. (3,4) для γ_1=γ, γ_2=1 (1,3), γ_1=γ_2=γ (2,4)*

Полученные аналитические зависимости рабочих характеристик электропривода колебательного движения при прерывистом движении указывают на возможность альтернативного выбора параметров электрической машины и функций регулирования при заданных параметрах нагрузки для построения специализированных комплексов с требуемыми кинематическими и силовыми характеристиками, например, для приводов подачи кузнечного прессового оборудования или технологических установок расфасовочно-упаковочного оборудования.

Выводы

1. Получены расчетные соотношения, описывающие рабочие и регулировочные характеристики электродвигателя колебательного движения при прерывистом движении для различных типов нагрузки.
2. Установлено, что влияние параметров электрической машины и функций регулирования на кинематические и силовые характеристики привода осуществляется в основном через коэффициенты пускового и демпфирующего электромагнитного момента.

Таблица. *Рабочие характеристики электропривода колебательного движения в режиме прерывистого перемещения*

<table>
<tr><td colspan="4">Частотные характеристики</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Амплитудные</td><td>χ_m</td><td colspan="2">$\dfrac{M_1}{\Omega(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})[1+Z(\Omega)^2]^{0,5}}$</td></tr>
<tr><td>ω_m</td><td colspan="2">$\dfrac{M_1}{(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})[1+Z(\Omega)^2]^{0,5}}$</td></tr>
<tr><td>M_m</td><td colspan="2">$M_1\left[\dfrac{R_{\text{мех}}{}^2+L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2}{(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})^2(1+Z()\Omega^2)}\right]^{0,5}$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Механические характеристики по координате положения и скорости</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ампли-тудные</td><td>$\chi_m(M_m)$</td><td colspan="2">$M_m\Omega^{-1}[L_{\text{мех}}^2\Omega^2+R_{\text{мех}}^2]^{-0,5}$</td></tr>
<tr><td>$\omega_m(M_m)$</td><td colspan="2">$M_m[L_{\text{мех}}^2\Omega^2+R_{\text{мех}}^2]^{-0,5}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Мгновенные (эллипс)</td><td>$\chi(M_{\text{эм1}})$</td><td colspan="2">$\dfrac{\chi^2}{\chi_m^2}[1+Z(\Omega)^2]+\dfrac{M_{\text{эм1}}^2}{M_m^2}[1+Z(\Omega)^2]-2\dfrac{M_{\text{эм}}\chi}{M_m\chi_m}Z(\Omega)[1+Z(\Omega)^2]^{0.5}=1$</td></tr>
<tr><td>$\omega(M_{\text{эм1}})$</td><td colspan="2">$\dfrac{\omega^2}{\omega_m^2}\left[1+\dfrac{1}{Z(\Omega)^2}\right]+\dfrac{M_{\text{эм1}}^2}{M_m^2}\left[1+\dfrac{1}{Z(\Omega)^2}\right]-2\dfrac{M_{\text{эм1}}\omega}{M_m\omega_m}\dfrac{1}{Z(\Omega)^2}[1+Z(\Omega)^2]^{0.5}=1$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Регулировочные характеристики</td></tr>
<tr><td>γ</td><td colspan="2">γ_2=1, $\gamma_1=\gamma$–var</td><td>$\gamma_1=\gamma_2=\gamma$–var</td></tr>
<tr><td>χ_m</td><td colspan="2">$\dfrac{\gamma G_1}{\Omega[L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-(\gamma^2G_2+G_3)]^2]^{0,5}}$</td><td>$\dfrac{\gamma^2G_1}{\Omega[L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-\gamma^2(G_2+G_3)]^2]^{0,5}}$</td></tr>
<tr><td>ω_m</td><td colspan="2">$\dfrac{\gamma G_1}{[L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-(\gamma^2G_2+G_3)]^2]^{0,5}}$</td><td>$\dfrac{\gamma^2G_1}{[L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-\gamma^2(G_2+G_3)]^2]^{0,5}}$</td></tr>
<tr><td>M_m</td><td colspan="2">$\gamma G_1\left[\dfrac{R_{\text{мех}}{}^2+L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2}{L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-(\gamma^2G_2+G_3)]^2}\right]^{0,5}$</td><td>$\gamma^2G_1\left[\dfrac{R_{\text{мех}}{}^2+L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2}{L_{\text{мех}}{}^2\Omega^2+[R_{\text{мех}}-\gamma^2(G_2+G_3)]^2}\right]^{0,5}$</td></tr>
<tr><td colspan="4">Условия автономности регулирования параметров</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Автономность амплитуды</td><td>Координаты χ_m=const</td><td colspan="2">$\Omega=\left\{-\dfrac{(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})^2}{2L_{\text{мех}}{}^2}+\left[\dfrac{(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})^4}{4L_{\text{мех}}{}^4}+\dfrac{M_1^2}{L_{\text{мех}}{}^2\chi_m^2}\right]^{0.5}\right\}^{0.5}$</td></tr>
<tr><td>Скорости ω_m=const</td><td colspan="2">$\Omega=\left\{-\dfrac{\omega_m^2(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})^2-M_1{}^2}{\omega_m^2L_{\text{мех}}{}^2}\right\}^{0,5}$</td></tr>
<tr><td>Усилия M_m=const</td><td colspan="2">$\Omega=\left\{-\dfrac{M_m^2(R_{\text{мех}}-f_{\text{демп}})^2-M_1^2R_{\text{мех}}^2}{2L_{\text{мех}}^2(M_m^2-M_1^2)}\right\}^{0,5}$</td></tr>
</table>

3. В целях обеспечения линейности регулирования скорости и момента управление двигателем следует осуществлять только по одной из обмоток статора.
4. Показано, что с целью поддержания постоянства (автономности) амплитуды шага напряжение на одной из фазных обмоток статора двигателя должно регулироваться прямо пропорционально частоте шага.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. – С. 107–109.
2. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
3. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.
4. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
5. Петров Б.И., Полковников В.А. Динамические возможности следящих электроприводов. – М.: Энергия, 1976. – 128 с.

Поступила 21.04.2009 г.