

УДК 621.345.1

А.В. Аристов

Управление двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения

Рассмотрен вопрос автономного регулирования выходными параметрами двухфазного асинхронного двигателя при фазовом способе возбуждения прерывистого движения. Представлены функциональная схема системы управления электроприводом, а также алгоритмы управления, обеспечивающие автономное правление по координате, скорости и моменту.

Ключевые слова: автономное регулирование, шаговый режим, асинхронный двухфазный двигатель.

Обеспечение режима плавного пуска и остановки двухфазного асинхронного двигателя (АД) в моменты времени, когда колебательное электромагнитное усилие равняется нулю [1], позволяет использовать электроприводы колебательного движения (ЭКД) в силовых механизмах с регулируемым прерывистым перемещением, например, в приводах подачи кузнечного прессового оборудования или в технологических установках расфасовочно-упаковочного оборудования.

Принцип работы ЭКД в режиме прерывистого движения заключается в создании шагового изменения электромагнитного поля, определяющего закон перемещения подвижного элемента двигателя, что может быть достигнуто за счет импульсного питания одной из обмоток исполнительного двигателя напряжением, когда электромагнитный момент переходит через ноль и прикладывается в одном и том же направлении [2].

При этом возникает проблема стабилизации амплитуды координаты подвижного элемента двигателя, скорости или момента при регулировании частоты шага. Решению этой задачи и посвящается данная работа.

Для определения автономности регулирования выходных параметров асинхронного двигателя и их анализа необходимо решить систему уравнений, описывающих электро-механический преобразователь энергии в системе координат α , β [3] при функциях регулирования, имеющих вид

$$U_{\alpha s}(t) = U_m \gamma_1 \left\{ \frac{1}{2} \sin(\omega_1 t + \alpha) + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1) \begin{bmatrix} \cos[(\omega_1 - (2i-1)\Omega)t + \alpha] \\ -\cos[(\omega_1 - (2i-1)\Omega)t + \alpha] \end{bmatrix} \right\}; U_{\beta s}(t) = U_m \gamma_2 \sin(\omega_2 t + \beta),$$

где U_m – амплитудное значение питающих фазных напряжений; 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 шага Ω на порядок меньше частот питающей сети ω_1 , ω_2 , с учетом корней характеристических уравнений функций регулирования определяются значения фазных токов во временной плоскости $i_{\alpha s}$, $i_{\alpha r}$, $i_{\beta s}$, $i_{\beta r}$ и значение электромагнитного момента, развиваемого асинхронным двигателем

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

где L_m – полная взаимдуктивность электрической машины.

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

$$M_{\text{эм}}(t) = M_1 \sin[\Omega t + \Psi_1] + M_2 \sin[(\omega_1 + \omega_2)t + \Psi_2] + \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1) \{ M_{3i} \sin[2i\Omega t + \Psi_{3i}] + \\ + M_{4i} [(\omega_1 + \omega_2 - (2i-1)\Omega)t + \Psi_{4i}] + M_{5i} \sin[(\omega_1 + \omega_2 + (2i-1)\Omega)t + \Psi_{5i}] \} + \\ + \left(N_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1)^2 N_i \right) \frac{d\chi}{dt}.$$

Здесь M_i , N_i , Ψ_i – величины, определяемые произведениями фазных токов и их производных по скорости ω . Первые составляющие электромагнитного момента с амплитудами M_i характеризует пусковой, а последняя – демпфирующий моменты.

Координата подвижного элемента двигателя $\chi(t)$ определится из решения уравнения движения электромеханического преобразователя энергии

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

где $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$ – коэффициенты инерционной и демпфирующей сил нагрузки.

Амплитуда первой гармоники координаты движения χ_{m1} (амплитуда шага) и ее фаза ψ_1 запишутся как

$$\chi_{m1} = \frac{M_1}{\Omega(R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}}) \sqrt{1 + Z(\Omega)^2}}; \quad \psi_1 = \arctg \frac{\sin \Psi_1 L_{\text{мех}} \Omega - \cos \Psi_1 (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}}) \Omega}{\cos \Psi_1 L_{\text{мех}} \Omega + \sin \Psi_1 (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}}) \Omega},$$

где $f_{\text{демпп}} = N_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1)^2 N_i$ – суммарный коэффициент электромагнитного

демпфирования асинхронного двигателя; $Z(\Omega) = L_{\text{мех}} \Omega / (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})$ – 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

$$M_m = M_1 \left[\frac{R_{\text{мех}}^2 + L_{\text{мех}}^2 \Omega^2}{(R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2 (1 + Z(\Omega)^2)} \right]^{0,5}; \quad \theta = \psi_1 + \arctg \frac{1}{Z(\Omega)}.$$

Искомые выражения позволяют определить условия автономности регулирования кинематических и силовых характеристик при шаговом движении ротора двигателя (таблица). Они взаимосвязывают частоту шага Ω с функциями регулирования через электромагнитный пусковой и демпфирующие моменты для произвольно заданных значений амплитуды координаты χ_m , скорости ω_m , и усилия M_m .

Условия обеспечения автономности при регулировании частоты шага

Условия автономности амплитуды	Координаты $\chi_m = \text{const}$	$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{(R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2}{2L_{\text{мех}}^2} + \right. \\ \left. + \left[\frac{(R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^4}{4L_{\text{мех}}^4} + \frac{M_1^2}{L_{\text{мех}}^2 m} \right] \right\}^{0,5}$
	Скорости $\omega_m = \text{const}$	$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{(R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2}{2L_{\text{мех}}^2} + \frac{M_1^2}{2 m L_{\text{мех}}^2} + \right. \\ \left. + \left[\frac{(\frac{2}{m} (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2 - M_1^2)^2}{4 m L_{\text{мех}}^4} \right] \right\}^{0,5}$
	Усилия $M_m = \text{const}$	$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{M_m^2 (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2 - M_1^2 R_{\text{мех}}^2}{2L_{\text{мех}}^2 (M_m^2 - M_1^2)} + \right. \\ \left. + \left[\frac{M_m^2 (R_{\text{мех}} - f_{\text{демпп}})^2 - M_1^2 R_{\text{мех}}^2}{2L_{\text{мех}}^2 (M_m^2 - M_1^2)} \right] \right\}^{0,5}$

Однако, как это видно, данные характеристики являются нелинейными. В первую очередь, это связано с тем, что составляющие пускового M_i и демпфирующего $f_{\text{демпп}}$ электромагнитного момента, определяющие в конечном итоге характер изменения выходных

параметров исполнительного двигателя, являются нелинейными функциями от коэффициента сигнала управления γ_i . Причем нелинейность составляющих электромагнитного момента 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 $f_{демп}$. Тем не менее для ряда случаев могут быть рекомендованы законы управления, позволяющие на практике обеспечить условия автономности.

Так, для поддержания постоянства амплитуды χ_m при регулировании частоты шага Ω для заданных параметров нагрузки при $R_{мех}=0$ согласно таблице и с учетом, что регулирование АД ведется только по обмотке управления,

$$M_1 = k \cdot G_1; \quad f_{демп} = (k)^2 \cdot G_2 + G_3,$$

где G_1, G_2, G_3 – коэффициенты, определяемые параметрами электрической машины; k – коэффициент передачи системы управления, можно записать:

$$\Omega = \left\{ \frac{((k)^2 \cdot G_2 + G_3)^2}{2 \cdot L_{мех}^2} + \left[\frac{((k)^2 \cdot G_2 + G_3)^4}{4 \cdot L_{мех}^4} + \frac{(k \cdot G_1)^2}{L_{мех}^2 \cdot \chi_m^2} \right]^{-0,5} \right\}^{0,5},$$

откуда следует, что коэффициент передачи системы управления должен изменяться по закону

$$k(\Omega) = \frac{1}{2\Omega\chi_m G_2} \left\{ 2\Omega\chi_m [G_1 - 2\Omega\chi_m G_2 G_3 - (G_1^4 - 4\Omega G_1^2 G_2 G_3 \chi_m - 4\Omega^3 \chi_m^2 G_2^2 L_{мех}^2)^{0,5}] \right\}^{0,5}.$$

На рис. 1 представлен закон изменения коэффициента передачи $k(\Omega)$, рассчитанный согласно представленному алгоритму (кривая 1).

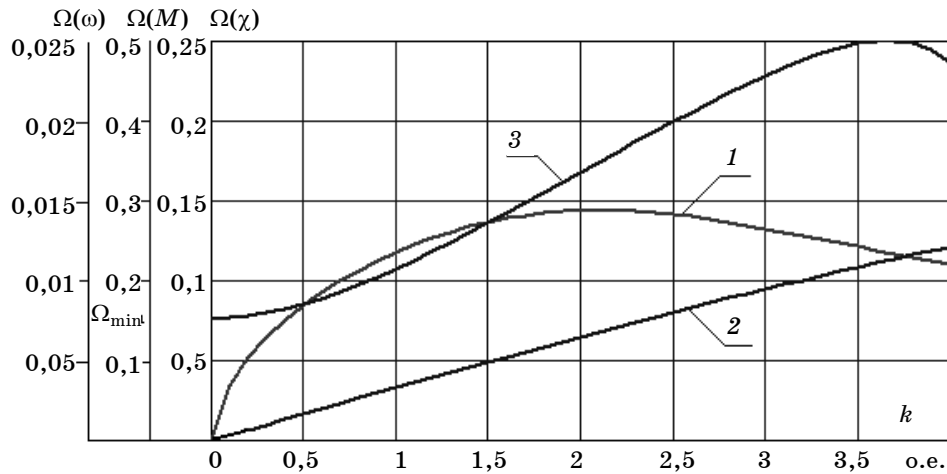


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи системы управления от частоты шага при условии обеспечения автономности амплитуды: 1 – координаты; 2 – скорости; 3 – момента

Учитывая, что максимальная частота шага Ω как минимум на порядок меньше частоты питающей сети ω_1 , а также, что коэффициент передачи должен изменяться от 0 до 1, то представленный алгоритм с достаточной степенью точности аппроксимируется в заданном частотном диапазоне изменением частоты шага зависимостью

$$k(\Omega) = \xi_\chi \Omega^2,$$

где ξ_χ – коэффициент, учитывающий параметры электрической машины и требуемую амплитуду шага.

Аналогично рассчитываются алгоритмы изменения коэффициентов передачи для обеспечения автономности по моменту и скорости.

Установлено, что обеспечение автономности амплитуды момента (усилия) возможно только в узком диапазоне изменения частоты шага (см. рис. 1, кривая 3). Считая амплитуду напряжения на обмотке возбуждения асинхронного двигателя постоянной и равной номинальной, начальное значение частоты шага, при которой возможно поддержание требуемой амплитуды момента, определяется параметрами асинхронного двигателя и его нагрузкой

$$\Omega_{\min} = \left\{ -\frac{(R_{\text{мех}} - G_3)^2}{2L_{\text{мех}}^2} + \frac{(R_{\text{мех}} - G_3)}{\sqrt{2}L_{\text{мех}}} \right\}^{0,5},$$

а коэффициент $k(\Omega)$ должен подчиняться закону

$$k(\Omega) = 3 \sqrt{\frac{\Omega - \Omega_{\min}}{M}}.$$

И только в случае обеспечения автономности амплитуды по скорости допустимо для установленных диапазонов изменения частоты аппроксимировать закон изменения $k(\Omega)$ линейной зависимостью (см. рис. 1, кривая 2)

$$k(\Omega) = \xi_{\omega} \Omega.$$

Следует сразу отметить, что при практической реализации условий автономности при периодическом движении необходимо учитывать нелинейности элементов схемы и в первую очередь модулятора.

Как показали результаты экспериментальных исследований, максимальные отклонения амплитуд шага, момента и скорости при реализации указанных алгоритмов в диапазоне отношения частот $\frac{\Omega}{\omega_1} = 0,02 \dots 0,1$ составили соответственно 7,12, 14,8 и 3,09%, в то

время как при имитационном моделировании в системе MatLAB указанные отклонения не превысили 1,5%.

На рис. 2 представлена функциональная схема системы управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения, реализующая данные алгоритмы управления.

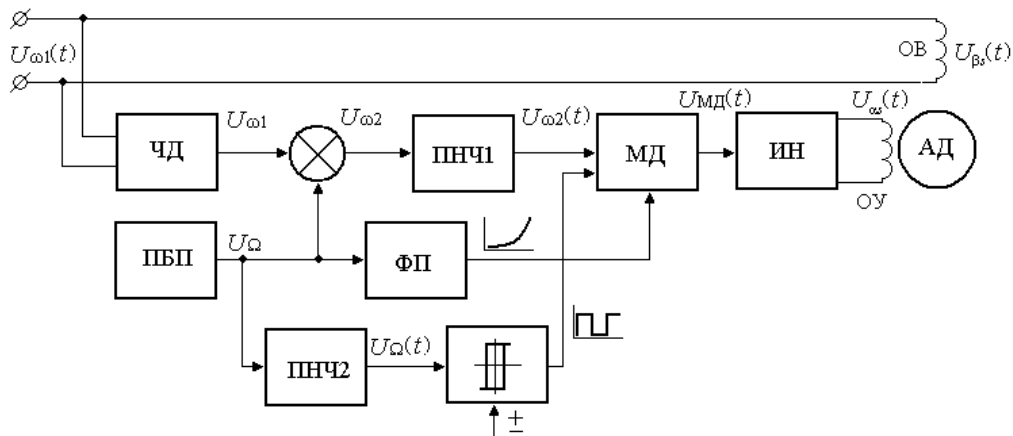


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с прерывистым движением

Она содержит асинхронный двигатель с обмоткой возбуждения (ОВ) и управления (ОУ), частотный демодулятор (ЧД), сумматор, прецизионный регулируемый блок питания постоянного напряжения (ПБП), два преобразователя напряжение–частота (ПНЧ1, ПНЧ2), инвертор напряжения (ИН), компаратор, модулятор с регулируемым коэффициентом передачи по напряжению (МД) и функциональный преобразователь (ФП).

Обмотка возбуждения асинхронного двигателя подключается непосредственно к клеммам источника переменного напряжения (сети) частоты ω_1 , а обмотка управления через инвертор напряжения (ИН) запитывается от модулятора с регулируемым коэффициентом передачи напряжением частоты ω_2 .

Модулятор выполняет сразу две функции: осуществляет прерывание напряжения управления с частотой шага Ω по сигналу, поступающему от компаратора, и регулирова-

ние напряжения управления в соответствии с заданными функциональным преобразователем алгоритмами. С учетом неустойчивости сетевого напряжения по частоте на выходе модулятора формируется напряжение управления инвертором

$$U_{\text{МД}} = \pm k(\Omega) \sin[(\omega_1 + \Delta \omega_1) + \Omega] t \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin[(2i-1)\Omega t]}{(2i-1)} \right\},$$

где $\Delta \omega_1$ – абсолютное значение девиации частоты сети.

Прецизионный регулируемый блок питания постоянного напряжения (ПБП) выполняет функции задачика частоты шага Ω . Так как последняя определяется разностью частот ω_1 и ω_2 , то благодаря наличию частотного демодулятора и сумматора, на выходе которого формируется напряжение, пропорциональное частоте ω_2 , удается стабилизировать частоту шага независимо от девиации частоты сети, что оказывает существенное влияние на координатную точность системы в целом.

Полярность выходных импульсов компаратора определяет направление движения шага АД.

Согласно функциональной схеме была разработана имитационная модель электропривода, реализующего прерывистый закон движения. Результаты исследований подтвердили полезность использования предложенных алгоритмов. В качестве примера на рис. 3 представлены диаграммы закона движения подвижного элемента асинхронного двигателя для двух значений частот Ω при обеспечении автономности амплитуды перемещения.

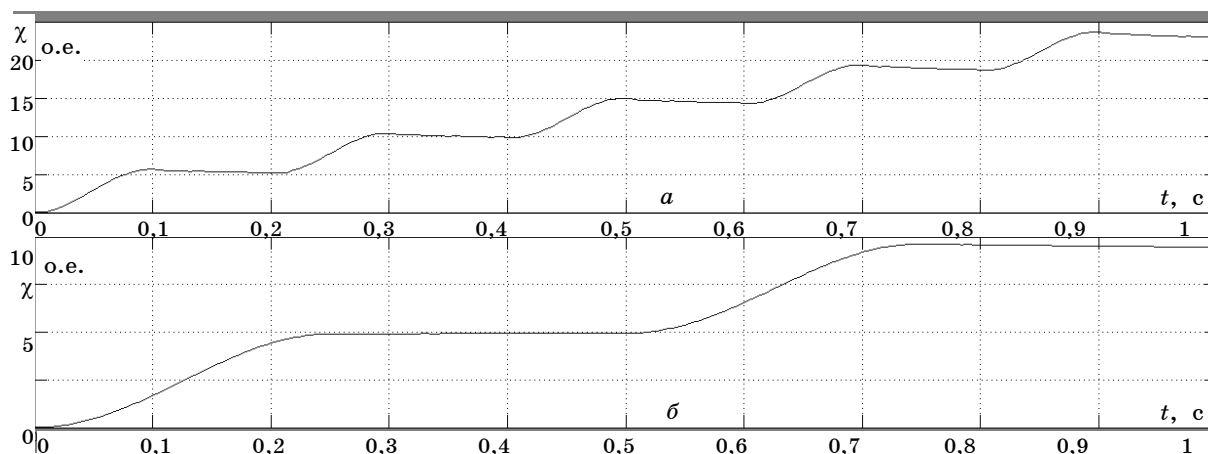


Рис. 3. Законы движения подвижного элемента асинхронного двигателя при $\Omega = 0,1$ о.е. (а); $\Omega = 0,04$ о.е. (б)

Литература

1. Аристов А.В. Безударный пуск асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1993. – № 5. – С. 52–57.
2. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Изв. Том. политех. ун-та. – 2008. – Т. 313, № 4. – С. 107–109.
3. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Аристов Анатолий Владимирович

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования ТПУ
Тел.: (382-2) 55-44-54
Эл. почта: Parist@sibmail.com

Aristov A.V.

Intermittent motion control mode for two-phase induction motor

The problem of off-line control for the output parameters of the two-phase induction motor was regarded under the phase excitation mode of the intermittent motion. The paper presents the functional diagram of the electric drive control system as well as control algorithms which provide the off-line control by the coordinate, velocity and moment.

Keywords: off-line control, step running, two-phase induction motor.