

УДК 677.023: 62-83

**ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ  
НА ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА СНОВАЛЬНОГО ВАЛА**

**INFLUENCE OF VARIATION OF WINDING PARAMETERS  
ON THE ELECTRIC DRIVE OF A WARPING SHAFT MECHANISM**

*В.Ф. ГЛАЗУНОВ, К.С. ШИШКОВ*  
V.F. GLAZUNOV, K.S. SHISHKOV

(Ивановский государственный энергетический университет)  
(Ivanovo State Power University)  
E-mail: ttp@igta.ru

*В статье выполнен анализ влияния вариаций параметров сновального вала на статические и динамические характеристики асинхронного электропривода. Получены функциональные зависимости от частоты полулогарифмических функций чувствительности системы к вариации момента инерции сновального вала, модуля упругости и постоянной времени натяжения основы, коэффициента передачи обратной связи по линейной скорости наматывания.*

*The analysis of the influence of variation of warping shaft parameters on static and dynamic characteristics of the induction electric drive has been carried out in the article. Functional dependences on the frequency of semilogarithmic sensitivity functions of the system to the variation of the moment of warping shaft inertia, elastic modulus and the constant of warp tension time, the transfer constant of the feedback on a winding linear speed have been received.*

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, передаточная функция, полоса пропускания, линеаризация, полулогарифмическая функция чувствительности, сновальный вал.

**Keywords:** an induction electric drive, transfer function, pass band, linearization, semilogarithmic sensitivity function, a warping shaft.

В настоящее время для механизма намотки сновальных валов перспективным является электропривод переменного тока

с микропроцессорной системой управления [1], построенный на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ро-

тором и преобразователя частоты со звеном постоянного тока, обладающий известными преимуществами по сравнению с используемым на практике электроприводом постоянного тока с тиристорным преобразователем и аналоговой системой управления, имеющим малую полосу пропускания и точность стабилизации линейной скорости снования, а также высокую чувствительность к вариации параметров и колебаниям момента нагрузки, что отрицательно влияет на обрывность нитей основы.

Изменение в процессе намотки момента инерции сновального вала, а также несовершенство датчика обратной связи по линейной скорости основы не позволяет реализовать все преимущества указанного выше асинхронного электропривода сновального вала. Здесь рассмотрим его чувствительность к вариации параметров намотки.

Учитывая, что система асинхронного электропривода является существенно нелинейной, предварительно линеаризуем ее с учетом принятых в [1] допущений. При этом пренебрегаем электромагнитными процессами в электродвигателе и считаем потокосцепление ротора постоянным и равным номинальному значению. Асинхронный двигатель в этом случае может быть представлен апериодическим звеном с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{I_q(s)}{U_q(s)} = \frac{1}{R_s(T_s s + 1)},$$

а преобразователь частоты – апериодическим звеном с запаздыванием на период модуляции:

$$H_{пч}^q(s) = \frac{U_q(s)}{U_{qr}(s)} = \frac{k_{пч}}{T_r s + 1}.$$

Здесь  $U_{qr}(s)$ ,  $U_q(s)$ ,  $I_q(s)$  – изображения по Лапласу проекций векторов напряжения на входе и выходе преобразователя

частоты и тока статора по оси  $q$ ;  $R_s$ ,  $T_s$  – активное сопротивление и постоянная времени обмотки статора;  $k_{пч}$ ,  $T_r$  – коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя частоты.

При этом передаточные функции контура активного тока статора и ПИ-регулятора угловой скорости двигателя при его настройке на симметричный оптимум имеют вид [1]

$$H_{кт}(s) = \frac{1}{k_{дт}(2T_{кт}s + 1)}, \quad (1)$$

$$H_{пов}(s) = \frac{J_c L_r k_{дт}}{3p L_{12} k_{дс} T_{кв}} \left(1 + \frac{1}{4T_{кв}s}\right). \quad (2)$$

Здесь  $k_{дт}$ ,  $k_{дс}$  – коэффициенты передачи обратных связей контуров тока и угловой скорости двигателя;  $T_{кт}$ ,  $T_{кв}$  – некомпенсированные постоянные времени данных контуров, с;  $L_{12}$ ,  $L_r$  – взаимная индуктивность и индуктивность обмотки ротора двигателя, Гн;  $p$  – число пар полюсов обмотки статора;  $J_c$  – приведенный к валу двигателя момент инерции механизма сновального вала, кг·м<sup>2</sup>.

При анализе внешнего контура регулирования линейной скорости снования не учитываем возможное проскальзывание между мерильным валом и основой. В качестве регулятора линейной скорости используем ПИД-регулятор с передаточной функцией [1]

$$H_{пу}(s) = \frac{1}{k_1 s} + k_2 + k_3 s = \frac{(k_1 k_2 + k_1 k_3 s) s + 1}{k_1 s}, \quad (3)$$

настраиваемый на параметры механизма сновального вала.

Здесь  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – постоянные времени интегрального, пропорционального и дифференцирующего регулятора.

В этом случае электродвигатель и сновальный вал могут быть представлены следующими соотношениями:

$$I_q(s) = I_{qr}(s) \frac{1}{k_{дт}(2T_{кр}s + 1)}; M(s) = I_q(s) \frac{3pL_{12}}{2L_r}; \Omega_r(s) = \frac{M(s) - M_c(s)}{(J_c + J_h)s}; \quad (4)$$

$$\vartheta_h(s) = \Omega_r(s) \frac{\rho_c}{i_p}; F_1(s) = \Delta\vartheta(s)H_n(s) = \Delta\vartheta(s) \frac{Ek_{\vartheta}}{T_c s + 1}; \Omega_m(s) = [F_1(s) - F_0(s) - F_{cm}(s)] \frac{\rho_m}{J_m s}. \quad (5)$$

Здесь  $\Omega_r, \Omega_m$  – угловые скорости электродвигателя сновального вала и мерильного вала, рад/с;  $F_0(s), F_1(s), F_{cm}(s)$  – соответственно натяжение основы до и после мерильного вала и статическое окружное усилие от действия механизма сновального вала, приведенное к валу двигателя, Н;  $\vartheta_m, \vartheta_h$  – линейные скорости основы на поверхности мерильного и сновального валов, м/с;  $\rho_m, \rho_c$  – радиусы мерильного и сновального валов;  $J_m, J_h$  – моменты инерции мерильного вала и катушки, кг·м<sup>2</sup>;  $T_c$  – постоянная времени натяжения основы, с;  $E$  – модуль упругости основы, Н;  $k_{\vartheta} = 1/v_m$ ;  $i_p$  – передаточное число редуктора.

На рис. 1 представлена структурная схема линейризованной системы асинхронного электропривода сновального вала, построенная в соответствии с (1)...(5).

Для анализа влияния вариаций параметров катушки воспользуемся полулогарифмической функцией чувствительности [2]:

$$S_n^{W_3(s)} = \frac{\partial \ln W_3(s)}{\partial \ln n} = \frac{\partial W_3(s)}{\partial n} \frac{n}{W_3(s)}, \quad (6)$$

где  $n$  – варьируемый параметр;  $W_3(s)$  – передаточная функция замкнутой системы.

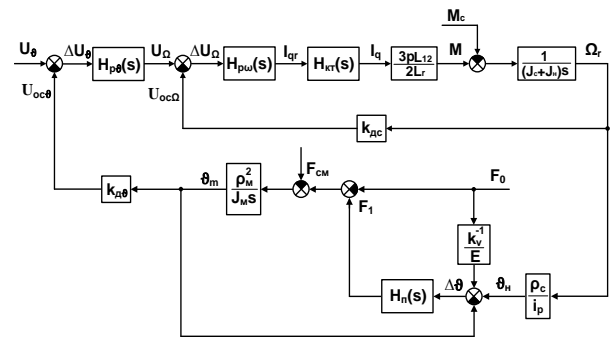


Рис. 1

С учетом правил преобразования структурных схем передаточная функция замкнутой линейризованной системы асинхронного электропривода сновального вала (рис. 1) примет вид:

$$W_3^5(s) = \frac{v_m(s)}{U_0(s)} = \frac{m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s + m_0}{n_5 s^5 + n_4 s^4 + n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}, \quad (7)$$

$$\text{где } m_3 = \frac{4T_{кц}\rho_c k_3}{k_{дс} i_p}; \quad m_2 = \frac{\rho_c (4T_{кц} k_2 + k_3)}{k_{дс} i_p};$$

$$m_1 = \frac{\rho_c}{i_p k_{дс}} \left[ k_2 + \frac{4T_{кц}}{k_1} \right]; \quad m_0 = \frac{\rho_c}{k_{дс} k_1 i_p};$$

$$n_5 = \frac{8T_{кц}^2 J_m T_c}{Ek_{\vartheta} \rho_m^2} \frac{J_0 + J_h}{J_0};$$

$$n_4 = \frac{4T_{кц} J_m}{Ek_{\vartheta} \rho_m^2} \left[ T_c + \frac{J_0 + J_h}{J_0} \cdot 2T_{кц} \right];$$

$$n_3 = 8T_{кц}^2 \frac{J_0 + J_h}{J_0} + \frac{J_m}{Ek_{\vartheta} \rho_m^2} (T_c + 4T_{кц}) + \frac{4T_{кц} \rho_c k_3 k_{д\vartheta}}{i_p k_{дс}};$$

$$n_2 = 4T_{кц} + \frac{J_m}{Ek_{\vartheta} \rho_m^2} + \frac{\rho_c (4T_{кц} k_2 + k_3) k_{д\vartheta}}{i_p k_{дс}};$$

$$n_1 = 1 + \frac{\rho_c k_{д\vartheta}}{i_p k_{дс}} \left( k_2 + \frac{4T_{кц}}{k_1} \right); \quad n_0 = \frac{\rho_c k_{д\vartheta}}{k_1 i_p k_{дс}}.$$

Здесь  $k_{д\vartheta}$  – коэффициент передачи датчика обратной связи линейной скорости основы.

Учитывая полосу пропускания системы электропривода сновального вала и соотношения коэффициентов при производных

передаточной функции (7), редуцируем ее передаточной функцией третьего порядка:

$$W_3^3(s) = \frac{m_2 s^2 + m_1 s + m_0}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}. \quad (8)$$

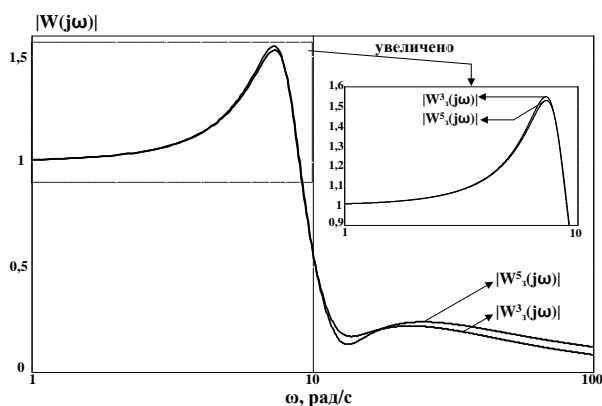


Рис. 2

Возможность этого покажем, построив амплитудно-частотные характеристики системы (рис. 2) для сновальной машины типа СП-140 с параметрами [3]:  $J_M=0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $J_c=0,67 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\rho_M=0,053 \text{ м}$ ;  $\rho_m=0,053 \text{ м}$ ;  $\rho_c=0,12 \text{ м}$ ;  $L=0,56 \text{ м}$ ;  $E=485 \text{ Н}$  и асинхронного электродвигателя типа 4А132S4У3 с параметрами [1]:  $P_H=7,5 \text{ кВт}$ ,  $U_H=220 \text{ В}$ ,  $I_H=15,1 \text{ А}$ ,

$M_H=49 \text{ Нм}$ ,  $\Omega_H=153 \text{ с}^{-1}$ ,  $2p=4$ ,  
 $J=0,028 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $R_s=0,68 \text{ Ом}$ ,  $R_r=0,455 \text{ Ом}$ ,  
 $L_s=0,143 \text{ Гн}$ ,  $L_r=0,145 \text{ Гн}$ ,  $L_{12}=0,139 \text{ Гн}$ .

На рис. 2 представлены расчетные амплитудно-частотные характеристики  $W_3^5(s)$ ,  $W_3^3(s)$  замкнутой системы асинхронного электропривода сновального вала, полученные с использованием программы MathCAD 2001.

Из полученных АЧХ определяем частоты пропускания, соответствующие редуцированной и исходной передаточным функциям:  $\omega_n^{[2]}=9,62 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_n^{[5]}=9,65 \text{ рад/с}$ , а также резонансные частоты  $\omega_p^{[3]}=7,94 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_p^{[5]}=8,02 \text{ рад/с}$  и частоты среза  $\omega_c^{[3]}=8,95 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_c^{[5]}=9 \text{ рад/с}$ .

Анализ полученных АЧХ исходной  $W_3^{[5]}(s)$  и редуцированной  $W_3^{[3]}(s)$  показывает их достаточно хорошее совпадение в области полосы пропускания. Тогда с учетом (8) логарифмические функции чувствительности системы к вариации, соответственно момента инерции сновального вала, модуля упругости и постоянной времени основы, а также коэффициента обратной связи по линейной скорости снования, примут вид:

$$S_J = -\frac{m_3^{[1]} s^3}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}; S_E = \frac{m_3^{[2]} s^3 + m_2^{[2]} s^2}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}; \quad (9)$$

$$S_{k_{d9}} = -\frac{m_3^{[3]} s^3 + m_2^{[3]} s^2 + m_1^{[3]} s + m_0^{[3]}}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}; S_{T_c} = -\frac{m_3^{[4]} s^3}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0}, \quad (10)$$

$$\text{где } m_3^{[1]} = 8T_{kc}^2 \frac{J_H + J_0}{J_0}; m_3^{[2]} = \frac{J_M}{Ek_9 \rho_M^2} (T_c + 4T_{kc});$$

$$m_1^{[3]} = \frac{\rho_c k_{d9}}{i_p k_{dc}} (k_2 + \frac{4T_{kc}}{k_1}); m_0^{[3]} = \frac{\rho_c k_{d9}}{k_1 i_p k_{dc}};$$

$$m_2^{[2]} = \frac{J_M}{Ek_9 \rho_M^2}; m_3^{[3]} = \frac{4T_{kc} \rho_c k_3 k_{d9}}{i_p k_{dc}};$$

$$m_3^{[4]} = \frac{J_M T_c}{Ek_9 \rho_M^2}.$$

$$m_2^{[3]} = \frac{\rho_c k_{d9}}{i_p k_{dc}} (4T_{kc} k_2 + k_3);$$

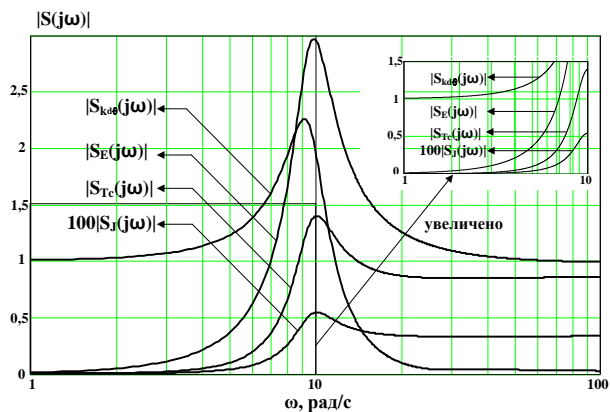


Рис. 3

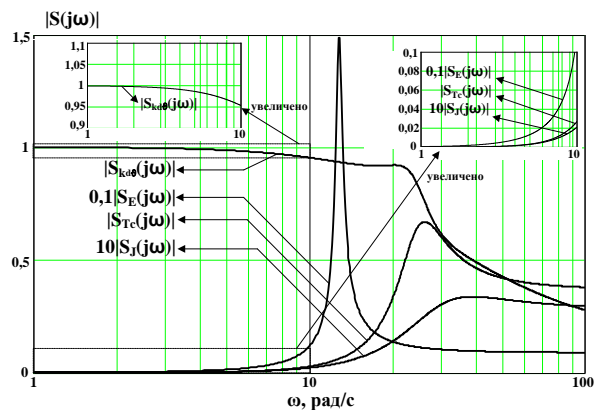


Рис. 4

На рис. 3 и 4 показаны графические зависимости функций чувствительности системы электропривода от частоты к вариации рассматриваемых параметров в начале (рис. 3) и в конце (рис. 4) процесса намагнивания. Их анализ (при  $s=0$ ) показывает, что наибольшее влияние на статические характеристики системы оказывают вариации коэффициента обратной связи линейной скорости снования, который зависит от упруговязкого скольжения между основой и поверхностью мерильного вала, а также коэффициента передачи тахогенератора. Устранение указанной чувствительности возможно на основе бесконтактного способа измерения линейной скорости или восстановления этой координаты на основе идентификаторов состояния. Следует отметить, что вариации других параметров катушки на статические показатели системы существенного влияния не оказывают.

Установлено, что на динамические характеристики электропривода механизма сновального вала большее влияние оказывают вариации всех параметров в начале процесса снования, когда функции чувствительности достигают экстремума на резонансной частоте, лежащей в пределах полосы пропускания ( $\omega < 10$  рад/с), по сравнению с их значением в конце катушки. Так, в конце катушки сновального вала в диапазоне частот  $10$  рад/с  $< \omega < 100$  рад/с происходит увеличение функции чувствительности к вариации модуля упругости

основы почти в 6 раз, в отличие от начала катушки, когда она увеличивается до 2,25 на частоте резонанса. При этом чувствительность САУ в области низких частот оказывается более высокой.

## ВЫВОДЫ

Наибольшее влияние на динамические характеристики системы асинхронного электропривода механизма сновального вала оказывают вариации модуля упругости основы и коэффициента передачи обратной связи по линейной скорости в начале катушки, а на статические характеристики – только вариации последнего параметра, обусловленные нестабильностью параметров измерителя линейной скорости и вязкоупругим скольжением между основой и мерильным валом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ИГЭУ, 2008.
2. *Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.* Чувствительность систем автоматического управления. – Л.: Энергия, 1969.
3. *Кулида Н.А.* Теоретические основы повышения эффективности партионного снования. – Иваново: ИГТА, 2003.

Рекомендована кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок. Поступила 26.04.11.