

**Выводы.** 1. Предложена математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя с нелинейными параметрами, составленная в среде MatLab (пакет Simulink). Готовые модели двигателей, представленные в данном программном пакете, составлены на основе известных схем замещения и используют только постоянные параметры, что не может отразить всей физики явлений, поэтому результаты моделирования с использованием этих готовых блоков можно принимать с определенными допущениями. Применение предложенной модели позволяет исследовать переходные процессы в двигателе с учетом эффекта вытеснения тока.

2. Составлена программа расчета всех параметров, используемых в предложенной модели двигателя, в среде MatLab. Приведена подробная блок-схема данной программы. Все вычисления определяются точностью, задаваемой пользователем. Полученные параметры опробованы при проведении исследований переходных процессов на математических моделях.

#### Литература

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008. 368 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / пер. с нем. А.А. Дартау, В.А. Щедровича; под ред. А.И. Вольдека. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
3. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
4. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>.

---

ВИЗГИНА ЕЛЕНА ИГОРЕВНА – магистр техники и технологий, научный сотрудник, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ВНИИР), Россия, Чебоксары ([lena\\_vizgina@rambler.ru](mailto:lena_vizgina@rambler.ru)).

VIZGINA ELENA IGOREVNA – master of technics and technology, scientific worker, JSC «VNIIR», Russia, Cheboksary.

---

УДК 62-83:621.3.07:681.527.2

В.И. ВИШНЕВСКИЙ, С.А. ЛАЗАРЕВ

## АДАПТИВНЫЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РЕЖИМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, адаптивный скользящий режим управления, настраиваемая скользящая поверхность.

Предложен метод построения адаптивного скользящего управления скоростью асинхронного электродвигателя. Получены алгоритмы адаптивного управления скоростью и потоком ротора на основе настраиваемой поверхности скольжения.

V.I. VISHNEVSKIY, S.A. LAZAREV

### THE ADAPTIVE SLIDING-MODE CONTROL SPEED OF INDUCTION MOTOR

**Key words:** induction motor, adaptive sliding-mode control, adjusted sliding surface.

The method of construction of the adaptive sliding-mode control is offered by speed of the induction motors. Algorithms of adaptive management are received by speed and a stream of a rotor on the basis of an adjusted sliding surface surface.

В настоящее время весьма актуальна задача рационального использования электроэнергии, обеспечения решения поставленных задач с минимальными возможными затратами энергии. На сегодняшний момент наиболее перспективным с точки зрения коэффициента полезного действия и компактности являются электропривода (ЭП) на базе электрических машин перемен-

ного тока с питанием от силовых полупроводниковых преобразователей (ПП) напряжения. Характерная черта таких ЭП – релейная нелинейность обусловленная работой полупроводниковых приборов, т.е. динамическая система ЭП описывается дифференциальными уравнениями с разрывными правыми частями. Наряду с многомерной релейной характеристикой силового преобразователя существуют нелинейности, присущие машинам переменного тока. Таким образом, автоматизированный асинхронный электропривод представляет собой нелинейную динамическую систему с линейным входением управления, разрывный характер которого обусловлен ключевым режимом работы полупроводникового преобразователя [6]. Развитие современной теории нелинейных систем с разрывным управлением позволило разработать методы синтеза нелинейных законов управления асинхронного электропривода в скользящих режимах. Реализация управления на базе многомерного скользящего режима невозможна без обеспечения должной информации о компонентах вектора состояния объекта управления, прямое измерение которых нецелесообразно по причине усложнения и удорожания объекта управления и снижения его эксплуатационных качеств. Перспективный путь решения поставленной задачи лежит в разработке алгоритма, оценивания вектора состояния объекта по его наблюдаемым координатам [1].

При работе электродвигателя в составе ЭП целью управления являются обеспечение сходимости угловой скорости вращения ротора

$$e_{\omega} = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\omega(t) - \omega_z(t)\| = 0 \quad (1)$$

с желаемой динамикой при произвольном характере изменения момента внешней нагрузки; высокое качество процессов управления; инвариантность к внешним возмущениям; малая чувствительность к изменениям динамических свойств объекта управления в сочетании с экономичностью передачи энергии и простоты получения вращающегося момента. Полная управляемость ЭП гарантируется, если обеспечивается управление электромагнитным моментом двигателя. Во всех электромеханических преобразователях вращающий момент образуется в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора или магнитного поля одного элемента и тока другого. Для получения однозначных функций управления обе величины должны быть независимы друг от друга, и тогда одну из них можно поддерживать постоянной, а с помощью другой осуществлять регулирование. В качестве независимой и постоянной величины целесообразно выбрать потокосцепление ротора. В этом случае реализуется дополнительная цель управления:

$$e_{\psi} = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\psi_r - \psi_{r^s}\| = 0 \quad (2)$$

с желаемой динамикой, где  $\psi_{r^s}$  – желаемая (эталонная) модель потокосцепления ротора асинхронного электропривода.

Необходимое состояние ЭП может быть обеспечено путём выбора соответствующих задающих воздействий для системы управления: электрической частоты вращения ротора  $\omega_z$ , желаемого потока ротора  $\psi_{r^s}$ . При выбранных задающих воздействиях поведение ЭП характеризуется функциями ошибок управляемых переменных, которыми являются отклонения фактических значений регулируемых величин от задающих воздействий:

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt}(\omega_z - \omega) + c_1(\omega_z - \omega) \\ \Psi - \Psi_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{de_\omega}{dt} + c_1 e_\omega \\ e_\Psi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $c_1$  – положительная константа.

Для решения поставленной задачи управления достаточно обеспечить равенство функций (3) нулю. Действительно, уравнение  $s_1 = 0$  можно рассматривать как дифференциальное уравнение рассогласования фактической и заданной скоростей вращения ротора, которое при  $c_1 > 0$  будет стремиться к нулю по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\frac{1}{c_1}$ . Уравнение

$s_2 = 0$  описывает процесс изменения рассогласования фактического и заданного показателей потокосцепления ротора. Одним из возможных вариантов одновременного обеспечения равенства функций (3) нулю является организация скользящего режима по пересечению поверхностей  $s_1 = 0, s_2 = 0$  [6, 8, 9]. Реализация управления на базе многомерного скользящего режима (3) проблематична по причине возможной потери работоспособности системы при изменении параметрических возмущений в широких пределах, что приводит к недопустимому увеличению коэффициента  $\gamma$  в управлении  $\mathbf{u} = -\gamma \text{sign}(s(e_\omega, e_\Psi))$  и, как следствие, к недопустимо большому значению управляющего воздействия в условиях ограниченной энергии управления применяемых элементов ПП, их механической прочности, предельных нагрузочных характеристик и конкретных условий работы. Для расширения границ применения теории систем со скользящим движением рассмотрим путь, основанный на настройке поверхности скольжения [2].

Итак, для достижения цели управления (2) поверхность разрыва выбираем в виде

$$\sigma(|\Psi_r|, i, \theta) = \theta |\Psi_r| + i_{s\alpha} = 0, \quad (4)$$

что вытекает из равенства нулю производной  $\frac{d|\Psi_r^s|}{dt}$  в статическом режиме в системе дифференциальных уравнений, описывающих динамику асинхронного двигателя в системе координат, связанных с вектором потокосцепления ротора [4, 5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}^s}{dt} = -\frac{R_S + k_r^2 R_r}{\sigma L_S} i_{s\alpha}^s + \frac{k_r L_m}{\sigma L_S L_r} |\Psi_r^s| + \omega_{\Psi r} i_{s\beta}^s + \frac{1}{\sigma L_S} u_{s\alpha}^s; \\ \frac{di_{s\beta}^s}{dt} = -\frac{R_S + k_r^2 R_r}{\sigma L_S} i_{s\beta}^s - \frac{k_r}{\sigma L_S L_r} p \omega |\Psi_r^s| - \omega_{\Psi r} i_{s\alpha}^s + \frac{1}{\sigma L_S} u_{s\beta}^s; \\ \frac{d|\Psi_r^s|}{dt} = R_r k_r i_{s\alpha}^s - \frac{R_r}{L_r} |\Psi_r^s|; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3Pk_r}{2J} |\Psi_r^s| i_{s\beta}^s - T_L, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $|\Psi_r^s|(\omega_{\Psi_r} - p\omega) = k_r R_r i_{s\beta}^s$ ;  $\omega$  – угловая скорость ротора,  $|\Psi_r^s|$ ,  $u_{s\alpha}^s, u_{s\beta}^s$ ,  $i_{s\alpha}^s, i_{s\beta}^s$  – проекции пространственных векторов потока ротора, напряжения и тока статора;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ ,  $L_s, L_r, R_s, R_r, p, k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;  $T_e, T_L$  – электромагнитный и нагрузочный моменты.

В идеальном скользящем режиме система описывается уравнениями:

$$\begin{cases} p|\Psi_r| = (A_{11} - A_{12}\theta)|\Psi_r|; \\ \frac{di_{s\alpha}^s}{dt} = A_{21}i_{s\alpha}^s + A_{22}|\Psi_r^s| + B_2 u_{\Psi}^s; \\ \sigma(|\Psi_r|, i_{s\alpha}, \theta) = \theta|\Psi_r| + i_{s\alpha} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $A_{11} = \frac{R_r}{L_r}$ ,  $A_{12} = R_r k_r$ ,  $A_{21} = \frac{k_r L_m}{\sigma L_s L_r}$ ,  $A_{22} = -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s}$ ,  $B_2 u_{\Psi}^s = \omega_{\Psi_r} i_{s\beta}^s + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha}^s$ .

Желаемое уравнение потокосцепления ротора зададим в виде эталонной модели  $p|\Psi_{r\theta}| = A_* |\Psi_{r\theta}|$ . Идеальные параметры  $\theta_* = \theta_*(\xi)$  выбираем из условия согласованности эталонной модели потокосцепления ротора и (6)

$$A_{11} - A_{12}\theta_* = A_*; \forall \xi \in \Xi, \quad (7)$$

тогда из условия управляемости объекта существует  $\theta_* = (A_* - A_{11})A_{12}^{-1}$ . Поскольку коэффициенты  $A_{ij}(\xi)$  неидеальны, заменим идеальные параметры  $\theta_*$  настраиваемыми параметрами  $\theta(t)$ . Параметр  $\xi$  характеризует внешнее воздействие, например дрейф параметров, которые входят в коэффициенты уравнений, составляющих математическое описание объекта, и абстрактные параметры, характеризующиеся неточностью описания объекта. Параметр  $\xi$  должен находиться в области допустимых значений  $\forall \xi \in \Xi$ .

Синтез проведем методом функции Ляпунова [2]. Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_1(e_{\Psi_r}, \theta) = 0,5e_{\Psi_r}^T H e_{\Psi_r} + 0,5tr[T(\theta - \theta_*)^2],$$

где  $H > 0, T > 0$ . Определим производную от функции  $V_1(e_{\Psi_r}, \theta)$ , и в силу уравнений (6), (7) получим:

$$pV_1(e_{\Psi_r}, \theta) = e_{\Psi_r}^T H A_* e_{\Psi_r} + tr[(\theta - \theta_*)(-A_{12}^{-1} H e_{\Psi_r} \Psi_r + T^{-1} p\theta)].$$

Выбрав алгоритм настройки  $\theta(\xi)$  в виде  $p\theta = T A_{12}^{-1} H e_{\Psi_r} \Psi_r$  и с учётом существования функции Ляпунова:

$$pV_1(e_{\Psi_r}, \theta) \leq 0,5\rho e_{\Psi_r}^T H e_{\Psi_r},$$

где  $\rho = \frac{\lambda_{\min}(G)}{\lambda_{\max}(H)} > 0$ ,  $\lambda_{\min}(G)$ ,  $\lambda_{\max}(H)$  – максимальные и минимальные числа

соответствующих коэффициентов. Таким образом, все траектории системы (6) ограничены. Достижение цели управления (2) и условие достижимости (7) доказываются в соответствии с леммой Барбалатта [7].

Для синтеза разрывного управления выберем квадратичный функционал вида  $V_2(\sigma(\psi_r, i, \theta)) = 0,5(B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta))^2$ , вычислим его производную, учитывая  $p\sigma(\psi_r, i, \theta) = (\theta A_{11} + A_{21} + p\theta)\psi_r + (\theta A_{12} + A_{22})i + B_2 u_\psi$ :

$$pV_2(\sigma(\psi_r, i, \theta)) = B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)B_2^{-1}[(\theta A_{11} + A_{21} + p\theta)\psi_r + (\theta A_{12} + A_{22})i] + B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)u_\psi.$$

Выберем разрывную функцию управления в виде

$$u_\psi = -\gamma \text{sign}(B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)),$$

тогда выражение для  $pV_2(\sigma(\psi_r, i, \theta))$  примет вид:

$$\begin{aligned} pV_2(\sigma(\psi_r, i, \theta)) &= B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)B_2^{-1}(\theta A_{11}\psi_r + A_{12}i) + \\ &+ B_2^{-1}p\theta\psi_r + B_2^{-1}A_{21}\psi_r + B_2^{-1}A_{22}i + \gamma|B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)| \leq \\ &\leq |B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)|(|B_2^{-1}|\theta|A_{11}|\psi_r| + |\theta|A_{12}|i| + \\ &+ |A_{21}|\psi_r| + |A_{22}|i| + |p\theta|\psi_r|) - \gamma|B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)|. \end{aligned}$$

Чтобы обеспечить устойчивую работу в скользящем режиме на траекториях системы (6), при соблюдении условия  $pV_2(\sigma(\psi_r, i, \theta)) < 0$  для всех  $\forall \xi \in \Xi$  коэффициент  $\gamma$  должен соответствовать следующим условиям:

$$\gamma > \bar{\gamma} = \gamma_0(|\theta|(\gamma_{\psi_r}|\psi_r| + \gamma_I|i|) + \tilde{\gamma}_{\psi_r}|\psi_r| + \tilde{\gamma}_I|i| + |p\theta|\psi_r|) + \rho_2, \quad (8)$$

где  $\rho_2 > 0$ ,  $|p\theta| \leq \gamma_0|e_{\psi_r}|\psi_r|$ ,  $\gamma_0 \geq |GA_{12}^{-1}H|$ ,  $\gamma_0 \geq |B_2^{-1}|$ ,  $\gamma_{\psi_r} \geq |A_{11}|$ ,  $\gamma_I \geq |A_{12}|$ ,  $\tilde{\gamma}_{\psi_r} \geq |A_{21}|$ ,  $\tilde{\gamma}_I \geq |A_{22}|$ .

Отсюда получим следующий алгоритм управления потокосцеплением ротора с настраиваемой поверхностью скольжения:

$$\begin{aligned} u_\psi &= -\gamma \text{sign}(B_2^{-1}\sigma(\psi_r, i, \theta)); \quad \sigma(\psi_r, i, \theta) = \theta\psi_r + i_s; \\ p\theta &= \begin{cases} 0, & \text{при } \sigma(\psi_r, i, \theta) \neq 0; \\ p\theta = TA_{12}^{-1}He_{\psi_r}\psi_r, & \text{при } \sigma(\psi_r, i, \theta) = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Если величина потокосцепления ротора поддерживается неизменной  $|\psi_r^s| = \text{const}$ , то из структуры объекта управления (5) выделяется группа уравнений, соответствующая контуру регулирования механических характеристик. Чтобы получить выражение в регулярной форме для угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , найдём дифференциал второго порядка от  $\omega$  в соответствии с уравнением электромеханической характеристики:

$$p^2\omega = \frac{3Pk_r}{2J}|\psi_r^s|pi_{s\beta}^s - pT_L, \quad (10)$$

допустив, что разрабатываемая система позволит обеспечить  $|\psi_r^s| = \text{const}$ . Преобразуем выражение (10) путём замены  $pi_{s\beta}^s$ ,  $p\omega$  соответствующими выражениями из (7) с последующим исключением переменной состояния  $i_{s\beta}^s$ :

$$p^2\omega = -\frac{(R_S + k_r^2 R_r)}{\sigma L_s} p\omega - \frac{L_m k_r |\Psi_r^s|^2}{J\sigma L_s (L_m + L_r)} P\omega - \frac{1}{J} \frac{R_S + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} T_L + \frac{L_m |\Psi_r^s|}{J(L_m + L_r)} \left( \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta}^s - \omega_s i_{s\alpha}^s \right).$$

Используя коэффициенты  $A_\omega = A_{\omega n} + \Delta A_\omega$ ,  $B_\omega = B_{\omega n} + \Delta B_\omega$ ,  $C_\omega = C_{\omega n} + \Delta C_\omega$ , характеризующие номинальные параметры АД и их отклонения от номинальных значений перед соответствующими переменными состояния  $p\omega$ ,  $\omega$ ,  $T_L$ , и введя фиктивное управление вида

$$U_\omega = \frac{L_m |\Psi_r^s|}{J(L_m + L_r)} \left( \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta}^s - \omega_s i_{s\alpha}^s \right) = U_{\omega n} + \Delta U_\omega,$$

получим дифференциальное выражение в регулярной форме:

$$p^2\omega = -A_\omega p\omega - B_\omega \omega - C_\omega T_L + U_\omega. \quad (11)$$

Предположим, что управление осуществляется в скользящем режиме на многообразии функций (3) при следующих условиях: коэффициенты  $A_\omega = A_{\omega n}$ ,  $B_\omega = B_{\omega n}$ ,  $C_\omega = C_{\omega n}$  в выражении (11) постоянные и соответствуют номинальным значениям. Вычислим непрерывное эквивалентное управление [3], которое при начальном положении вектора состояния на этом многообразии обеспечивает тождественное равенство нулю производной  $s(e_\omega)$  и достижение цели управления (1) на траекториях системы (5):

$$ps_1(e_\omega) = -(A_{\omega n} - c_1)p\omega - B_{\omega n}\omega - C_{\omega n}T_L + U_{\omega n} = 0. \quad (12)$$

При этом из (12) эквивалентное управление будет иметь вид:

$$U_{\omega eq} = (A_{\omega n} - c_1)p\omega + B_{\omega n}\omega + C_{\omega n}T_L = U_{\omega n}. \quad (13)$$

Для компенсации параметрических возмущений, характеризующихся ограниченными коэффициентами в пределах

$$\min\Delta A_\omega < \Delta A_\omega < \max\Delta A_\omega; \min\Delta B_\omega < \Delta B_\omega < \max\Delta B_\omega; \min\Delta C_\omega < \Delta C_\omega < \max\Delta C_\omega, \quad (14)$$

и меняющихся по квазистационарному закону [3], используем конструкции разрывных функций вида:

$$\Delta U_\omega = (\gamma_{\omega 1} p\omega - \gamma_{\omega 2} \omega + \gamma_{\omega 3} |s_\omega|) \text{sign}(s_\omega). \quad (15)$$

Доказательство, что управление  $U_\omega = U_{\omega eq} + \Delta U_\omega$ , заданное (13) и (15), гарантирует возникновение скользящего режима, производится методом Ляпунова [2] с использованием квадратичной формы функции  $s_1(e_\omega)$ , играющей роль функции отклонения траектории от поверхности скольжения. Таким образом, управление обеспечивает условие:  $s_1(e_\omega)ps_1(e_\omega) < 0$ .

Используя выражения (13), (14) и (15), неравенство  $s_1(e_\omega)ps_1(e_\omega) < 0$  преобразуем к виду:

$$s_1(e_\omega)ps_1(e_\omega) = (\gamma_{\omega 1} - \Delta A_\omega)p\omega s_2(e_\omega) + (\gamma_{\omega 2} - \Delta B_\omega)i_{s\alpha}^s s_1(e_\omega) + \gamma_{\omega 3}|s_1(e_\omega)|s_1(e_\omega) < 0. \quad (16)$$

Исходя из (16) возникновение скользящего режима будет соблюдаться при условии, что:

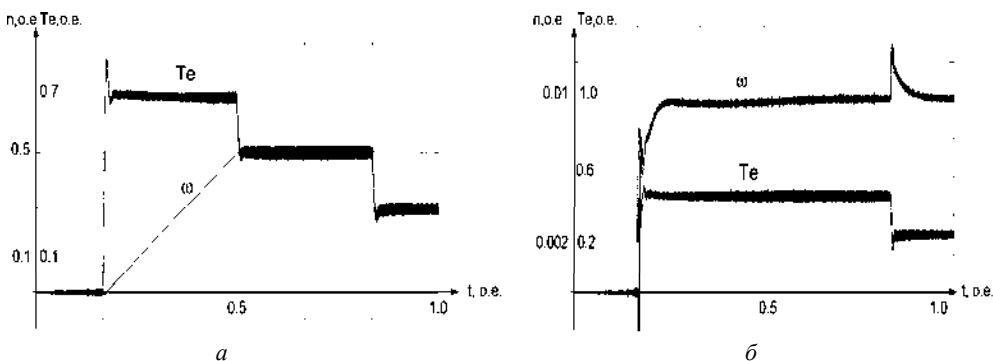
$$\gamma_{\omega 1} = \begin{cases} \gamma_{\omega 1}^+ < \min(\Delta A_{\omega}) \text{ при } \frac{d\omega}{dt} s_1(e_{\omega}) > 0, \\ \gamma_{\omega 1}^- > \min(\Delta A_{\omega}) \text{ при } \frac{d\omega}{dt} s_1(e_{\omega}) < 0; \end{cases} \quad \gamma_{\omega 2} = \begin{cases} \gamma_{\omega 2}^+ < \min(\Delta A_{\omega}) \text{ при } \omega s_1(e_{\omega}) > 0, \\ \gamma_{\omega 2}^- > \min(\Delta A_{\omega}) \text{ при } \omega s_1(e_{\omega}) < 0; \end{cases}$$

$$\gamma_{\omega 3} = \begin{cases} \gamma_{\omega 3}^+ \text{ при } s_1(e_{\omega}) > 0, \\ \gamma_{\omega 3}^- \text{ при } s_1(e_{\omega}) < 0. \end{cases} \quad (17)$$

Задавшись условиями  $\gamma_{\omega 1} = \gamma_{\omega 1}^+ = \gamma_{\omega 1}^-$ ,  $\gamma_{\omega 2} = \gamma_{\omega 2}^+ = \gamma_{\omega 2}^-$ ,  $\gamma_{\omega 3} = \gamma_{\omega 3}^+ = \gamma_{\omega 3}^-$ , управляющий закон может быть выражен как

$$U_{\omega} = U_{\omega eq} + \Delta U_{\omega} = U_{\omega eq} + (\gamma_{\omega 1} p\omega + \gamma_{\omega 2} \omega + \gamma_{\omega 3} |s_{\omega}|) \text{sign}(s_{\omega}). \quad (18)$$

Для подтверждения изложенных выше теоретических положений проведено математическое моделирование системы управления ЭП. Требуемое протекание электромагнитных процессов в двигателе обеспечивается соответствующим формированием двумерного вектора напряжения  $U_{\omega}$ ,  $U_{\psi}$  обобщенной двухфазной машины. На рисунке приведены диаграммы переходных процессов скорости, электромагнитного момента, тока статора и потокосцепления ротора, полученных в результате моделирования по алгоритмам (8), (9), (13), (17), (18) с оценками регулируемых координат  $\omega$ ,  $\psi_r^s$ , в соответствие с [1]. ЭП обрабатывает режимы – предварительного намагничивания двигателя, пуска под нагрузкой от  $(0,5T_H)$  номинального момента  $(0,5T_H)$  и задании скорости  $1/100$  от номинальной ( $\omega_n$ ) (*б*) и при задании скорости  $0,7\omega_n$  и нагрузке  $0,5T_H$  (*а*). При исследовании вводилось возмущение в виде дрейфа активного сопротивления статора 40%, дрейфа постоянной времени ротора 20% от номинального значения. Динамическая ошибка оценки по скорости при задании  $1/100$  от номинальной не превышает 15%, статическая ошибка не превышает 5%, динамическая ошибка оценки скорости при задании скорости выше  $0,1$  от номинальной не превышает 1%.



Результаты математического моделирования

Результаты, представленные на рисунке, показывают, что разработанный метод управления обеспечивает высокое быстродействие, простую реализацию, возможность сохранения стабильных динамических свойств при параметрических возмущениях в пределах допустимых значений.

## Литература

1. Вишневецкий В.И., Лазарев С.А., Митюков П.В. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода // Вестник Чувашского университета. 2010. № 3. С. 213-221.
2. Ла-Салль Ж., Левиец С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова. Л.: Мир, 1964. 168 с.
3. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: учебник для вузов. 2-е изд. / К.А. Пупков, Н.Д. Ергунов, А.И. Гаврилов и др.; под ред. Н.Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.
4. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронный электропривод с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: ИЦ «Академия», 2006. 272 с.
6. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981. 368 с.
7. Applied nonlinear control / Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li. Prentice-Hall Inc, 1991.
8. Utkin V.I. Sliding Mode Control Design Principle sand Application to Electric Drives // IEEE Trans. Ind. Electronics. 1993. Vol. 40, № 1. P. 23-26
9. Yan Z., Jin C., Utkin V.I. Sensorless sliding-mode control of induction motors // IEEE Trans. Ind. Electron, 2000. Vol. 47. P. 1286-1297.

---

**ВИШНЕВСКИЙ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ** – инженер, заместитель заведующего отделом электропривода, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (vishnevskiy-v@ekra.ru).

**VISHNEVSKIY VLADIMIR ILYICH** – engineer, deputy chief of Motor Control Systems Department, «EKRA» SPC Ltd., Russia, Cheboksary.

**ЛАЗАРЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой систем автоматического управления электроприводами, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ya.sa4808@yandex.ru).

**LAZAREV SERGEY ALEXANDROVICH** – candidate of technical sciences, assistant professor, head of Automation Motor Control System Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

---

УДК. 621.01

Б.А. ГОРДЕЕВ, И.Г. КУКЛИНА, А.Б. ГОРДЕЕВ, В.П. ГОРСКОВ

### СИНХРОНИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ\*

*Ключевые слова:* электродвигатель, вибрация, гидроопора, ротор.

*Рассмотрены вопросы взаимодействия источника возбуждения – асинхронного электродвигателя в переходных режимах работы с внешними вибрационными полями, которые могут генерироваться посторонними источниками, в частности вибростендом. Показано, что в определенных режимах работы вибростенда возникает явление захвата частоты вращения ротора электродвигателя внешним вибрационным полем, приводящее к затягиванию переходных процессов и дополнительному потреблению энергии источника. Приведены результаты экспериментальных исследований по снижению уровней вибрации и шума с использованием в качестве демпферов асинхронных электродвигателей гидроопор, обоснованы экономические предпосылки применения гидроопор в энергоёмких синхронизирующихся механических системах.*

**B.A. GORDEYEV, I.G. KUKLINA, A.B. GORDEEV, V.P. GORSKOV**  
**SYNCHRONIZATION OF DYNAMICAL SYSTEMS IN ELECTROTRANSPORT**

*Key words:* motor, vibration, gidroopora, rotor.

*The article deals with the interaction of the excitation source – induction motor in transient regimes with external vibration fields, which may be generated by outside sources, in particular shakers shown that in certain modes shaker the phenomenon of capture speed of the rotor motor external vibration field, leading to delays transients and additional consumption of energy source. The results of experimental studies to reduce levels of vibration and noise, using as a damper gidroopor induction motors, sound economic conditions in energy use gidroopor synchronized mechanical systems.*

Вопросы синхронизации и захвата частоты в динамических системах со многими степенями свободы, а также при испытаниях на виброустойчи-

---

\* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-970557-Р\_Поволжье).