

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

**Аннотация.** Рассматривается расчет переходного процесса управляющего воздействия системы ПЧ – АД с системой стабилизации напряжения преобразователь частоты с целью создания управляющего устройства.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, разомкнутая система, стабилизация напряжения.

**Тірек сөздер:** жиілікті түрлендіргіш, ажыратылған жүйе, кернеуді тұрақтандыру.

**Keywords:** preobrozavatel of frequency, the opened system, stabilization tension.

Ударные моменты, пусковые токи, потери мощности и потребление реактивной мощности могут быть снижены в разомкнутых системах управления асинхронного двигателя при плавном изменении частоты напряжения на статоре [1]. В связи с этим расчет оптимального управления  $U_y(t)$  является необходимой задачей для обеспечения плавного пуска системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ – АД). Структурная схема разомкнутой системы ПЧ – АД с системой стабилизации напряжения преобразователя частоты в среде MATLAB представлена на рисунке 1.

Отметим, что на рисунке 1 представлена структурная схема линейаризованной системы ПЧ – АД [2] без обратной связи по скорости, так как использование датчика скорости не всегда целесообразно и возможно [1]. Регулирование скорости асинхронного двигателя осуществляется

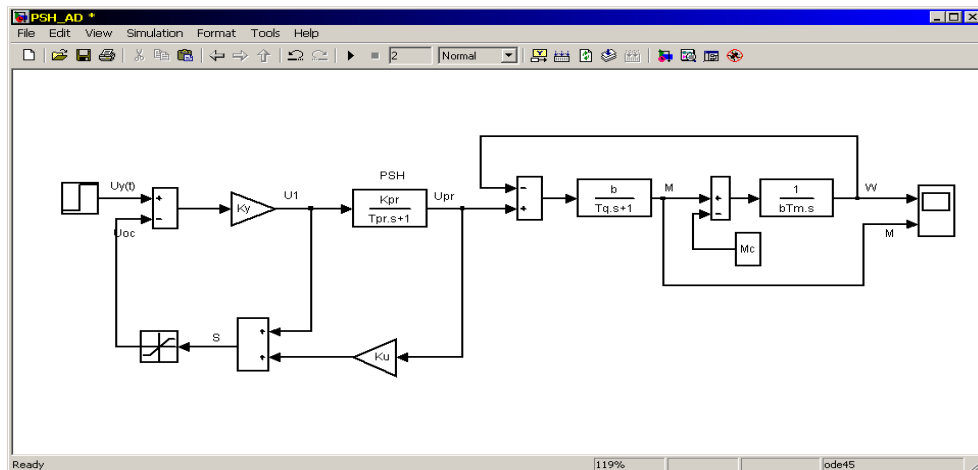


Рисунок 1 – Структурная схема разомкнутой системы ПЧ – АД изменением напряжения  $U_y(t)$ . Кривая переходного процесса  $U_y(t)$  (управляющее воздействие), как будет показано ниже, рассчитывается с помощью принципа максимума по квадратичному критерию качества переходных процессов системы ПЧ – АД [3]. В системе стабилизации напряжения  $U_{PR}$  преобразователя частоты в цепи обратной связи введено нелинейное звено с насыщением, которое предназначено для ограничения суммарного сигнала напряжений с выхода и входа преобразователя частоты. В структурной схеме системы ПЧ – АД приняты следующие обозначения [4]:

$b$  – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АД ( $b = 2M_K / (\omega_{0ном} S_K)$ );

$T_q$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепей статора и ротора АД, определяемая по формуле  $T_q = 1 / (\omega_{0эл.ном} S_K)$ ,

где  $\omega_{0эл.ном}$  – угловая скорость электромагнитного поля АД;  $K_{PR}$  – передаточный коэффициент ПЧ;  $T_{PR}$  – постоянная времени цепи управления ПЧ;  $T_M$  – электромеханическая постоянная времени.

Согласно принятым обозначением параметров системы ПЧ – АД с регулированием напряжения на статоре асинхронного двигателя, математическое описание этой системы при  $M_C = 0$  будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega}{dt} &= \frac{1}{bT_M} \Delta M; \\ \frac{d\Delta M}{dt} &= \frac{b}{T_q} \Delta U_{PR} - \frac{b}{T_q} \Delta\omega - \frac{1}{T_q} \Delta U_{PR}; \\ \frac{d\Delta U_{PR}}{dt} &= \frac{k_{PR}k_Y}{T_{PR}(1+k_y q(A))} \Delta U_Y - \left( \frac{k_{PR}k_Y k_U q(A)}{T_{PR}(1+k_y q(A))} + \frac{1}{T_{PR}} \right) \Delta U_{PR}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_Y$  – коэффициент усиления;  $k_U$  – коэффициент обратной связи по напряжению преобразователя частоты;  $\Delta\omega$  – приращение угловой скорости двигателя;  $\Delta M$  – приращение электромагнитного момента двигателя;  $\Delta U_{PR}$  – приращение напряжения преобразователя частоты;  $\Delta U_Y$  – приращение управляющего воздействия;  $q(A)$  – коэффициент гармонической линеаризации нелинейного звена с насыщением [5].

С целью удобства расчета кривой переходного процесса управляющего воздействия (оптимальное управление) системы ПЧ – АД, уравнения (1) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_1 x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_2 x_3 - a_3 x_1 - a_4 x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_5 x_4 - a_6 x_3, \quad \frac{dx_4}{dt} = \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $x_1 = \Delta\omega$ ,  $x_2 = \Delta M$ ,  $x_3 = \Delta U_{PR}$ ,  $x_4 = U_Y$ ,  $a_1 = \frac{1}{bT_M}$ ,  $a_2 = \frac{b}{T_q}$ ,  $a_3 = a_2$ ,  $a_4 = \frac{1}{T_q}$ ,

$a_5 = \frac{k_{PR}k_Y}{T_{PR}(1+k_y q(A))}$ ,  $a_6 = \left( \frac{k_{PR}k_Y k_U q(A)}{T_{PR}(1+k_y q(A))} + \frac{1}{T_{PR}} \right)$ ,  $\varphi$  – управление.

В качестве критерия оптимальности выбираем обобщенный интегральный критерий оптимальности в следующем виде:

$$Q = \frac{1}{2} \int_0^T \left( \sum_{i=1}^4 x_i^2 + c\varphi^2 \right) dt, \quad (3)$$

где  $c$  – весовой коэффициент управления.

Функция Гамильтона на основании метода принципа максимума принимает вид

$$H = -\frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + c\varphi^2) + \Psi_1 x_2 + \Psi_2 (a_2 x_3 - a_3 x_1 - a_4 x_2) + \Psi_3 (a_5 x_4 - a_6 x_3) + \Psi_4 \varphi. \quad (4)$$

Для вспомогательных переменных  $\Psi_i$  из (4) получаем уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= x_1 + a_3\Psi_2; & \frac{d\Psi_2}{dt} &= x_2 - \Psi_1 + a_4\Psi_2; \\ \frac{d\Psi_3}{dt} &= x_3 - a_2\Psi_2 + a_6\Psi_3; & \frac{d\Psi_4}{dt} &= x_4 - a_5\Psi_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Приравняв производную  $\frac{\partial H}{\partial \varphi}$  нулю, находим оптимальное значение

$$\varphi = (1/c)\Psi_4. \quad (6)$$

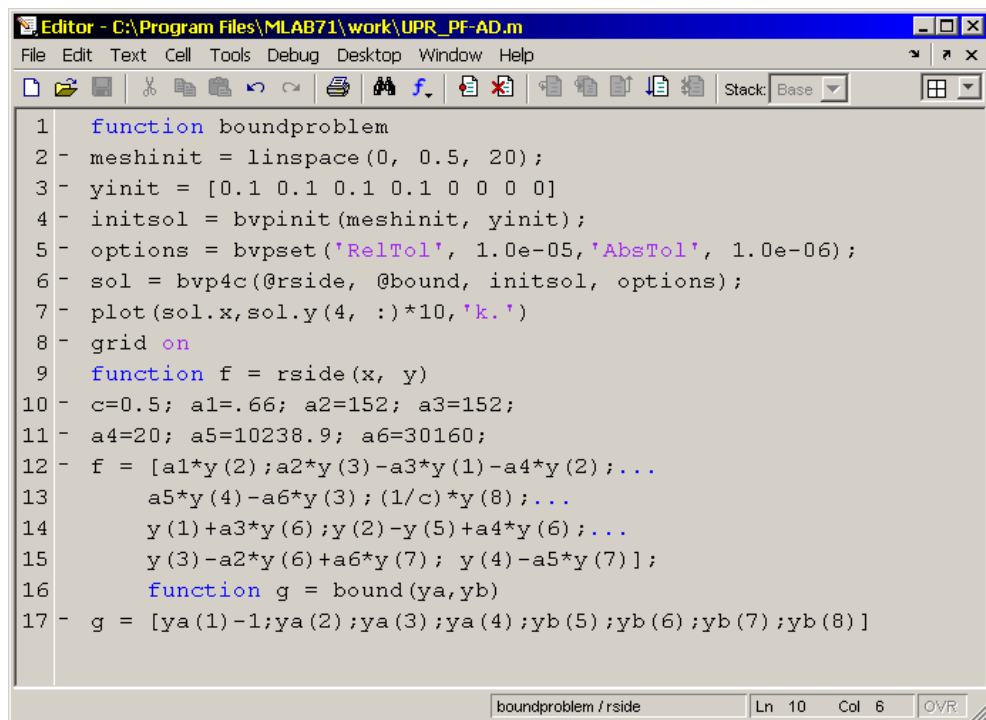
Поставляя значение (6) в последнее уравнение системы (2) и объединяя полученную систему уравнений с уравнениями (5), запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_1x_2; & \frac{dx_2}{dt} &= a_2x_3 - a_3x_1 - a_4x_2; \\ \frac{d\Psi_3}{dt} &= x_3 - a_2\Psi_2 + a_6\Psi_3; & \frac{dx_4}{dt} &= (1/c)\Psi_4; \\ \frac{d\Psi_1}{dt} &= x_1 + a_3\Psi_2; & \frac{d\Psi_2}{dt} &= x_2 - \Psi_1 + a_4\Psi_2; \\ \frac{d\Psi_3}{dt} &= x_3 - a_2\Psi_2 + a_6\Psi_3; & \frac{d\Psi_4}{dt} &= x_4 - a_5\Psi_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Граничные условия системы (7) имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= 1; & x_2(0) &= 0; & x_3(0) &= 0; & x_4(0) &= 0; \\ \Psi_1(T) &= 0; & \Psi_2(T) &= 0; & \Psi_3(T) &= 0; & \Psi_4(T) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Программа расчета кривой управляющего воздействия системы ПЧ- АД в MATLAB пред-ставлена на рисунке 2.



```

1 function boundproblem
2 meshinit = linspace(0, 0.5, 20);
3 yinit = [0.1 0.1 0.1 0.1 0 0 0 0];
4 initsol = bvpinit(meshinit, yinit);
5 options = bvpset('RelTol', 1.0e-05, 'AbsTol', 1.0e-06);
6 sol = bvp4c(@rside, @bound, initsol, options);
7 plot(sol.x, sol.y(4, :) * 10, 'k. ');
8 grid on
9 function f = rside(x, y)
10 c=0.5; a1=.66; a2=152; a3=152;
11 a4=20; a5=10238.9; a6=30160;
12 f = [a1*y(2); a2*y(3) - a3*y(1) - a4*y(2); ...
13 a5*y(4) - a6*y(3); (1/c)*y(8); ...
14 y(1) + a3*y(6); y(2) - y(5) + a4*y(6); ...
15 y(3) - a2*y(6) + a6*y(7); y(4) - a5*y(7)];
16 function g = bound(ya, yb)
17 g = [ya(1) - 1; ya(2); ya(3); ya(4); yb(5); yb(6); yb(7); yb(8)]

```

Рисунок 2

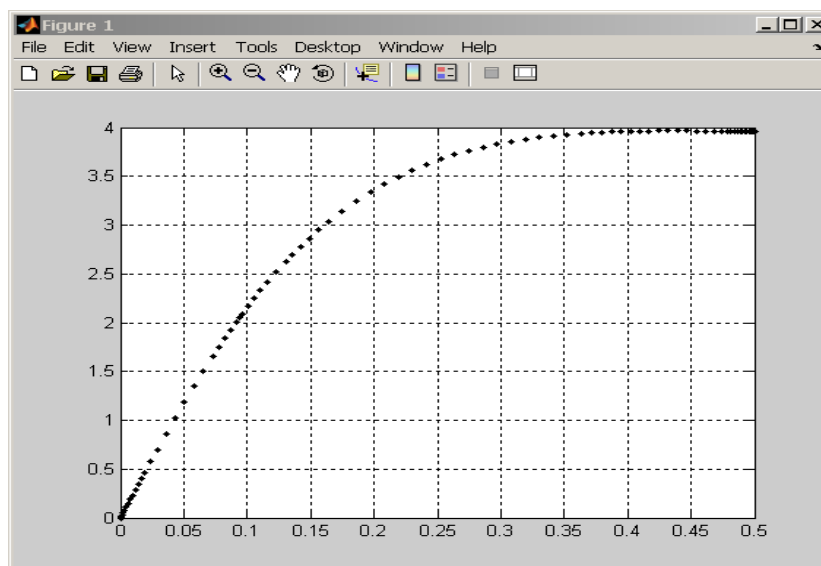


Рисунок 3 – График переходного процесса управляющего воздействия

Коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  представленные в программе, рассчитаны для асинхронного двигателя 4A132S6Y3 (5,5 кВт). Граничные условия (8) в программе даются в функции  $g$ .

Программа расчета оптимального управления системой ПЧ – АД обеспечивает вывод графика переходного процесса управляющего воздействия. Графика переходного процесса управляющего воздействия приводится на рисунке 3.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.М. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
- 2 Терехов И.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.
- 3 Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: Издательство «Наука», 1971. – 744 с.
- 4 Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
- 5 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Издательство «Профессия», 2004. – 752 с.
- 6 Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 1104 с.

## REFERENCES

- 1 Braslavsky I.Y., Ishmatov Z.S., Polesov V.M. M.: Publishing center "Akademy" 2004. 256 p.
- 2 Terekhov I.M. Osipov O. I. M.: Publishing center "Akademy", 2008. 304 p.
- 3 Feldbaum A.A., Butkovsky A.G. M: Science publishing house, 1971. 744 p.
- 4 Klyuchev V.I. - M: Energoatomizdat, M.: Power atom publishing house 1998. 704 p.
- 5 Besekersky V.A., Popov E.P. M.: Profession Publishing house, 2004. 752 p.
- 6 Anufriev I.E. Smirnov A.B. Smirnova E.N. BHV – Petersburg, 2005. 1104 p.

## Резюме

*Ю.И. Шадхин, Ж.Ж. Тойгожинова*

(Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы)

АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ – ЖИІЛІКТІ ТҮРЛЕНДІРГІШТІҢ АЖЫРАТЫЛҒАН  
ЖҮЙЕСІН ТИІМДІ БАСҚАРУ

Шығыс кернеуді тұрақтандыру жүйесімен асинхронды қозғалтқыш – жиілікті түрлендіргіштің ажыратылған жүйесі көрсетілген. Асинхронды қозғалтқыш – жиілікті түрлендіргіш жүйесін басқару әсерінің өтпелі процесін есептеу бағдарламасы өңделген.

**Тірек сөздер:** жиілікті түрлендіргіш, ажыратылған жүйе, кернеуді тұрақтандыру.

**Summary**

*Y. I. Shadkhin, J. J. Toygozhinova*

(Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of  
Kazakhstan)

OPTIMUM CONTROL OF THE OPENED SYSTEM  
PEREOBRAZOVATEL OF FREQUENCY – THE ASYNCHRONOUS ENGINE

The opened system the frequency converter – the asynchronous engine with system of stabilization of output tension a preobrozavatel of frequency is offered. The program of calculation of transient of operating influence of system the frequency converter – the asynchronous engine is developed.

**Keywords:** preobrozavatel of frequency, the opened system, stabilization tension.

*Поступила 04.09.2013 г.*