

РАЗРАБОТКА ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ГЛАВНОГО ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА

Лебедь В. Т., Квашнин В. О., Шаповал Д. А.

Приведена конструктивная разработка отдельных элементов кинематической схемы станка статических нагрузок. На основе экспериментально снятых зависимостей для скорости и тока двигателя при пуске, на холостом ходу и под нагрузкой, и аналитически определенных методом последовательных итераций статической механической характеристики, определены основные параметры станда. Были получены значения момента собственных потерь привода, подтверждено паспортное значение момента инерции двигателя. Определено время работы на холостом ходу при разгоне и под нагрузкой. Также была разработана схема подключения периферийных устройств (датчика тока на эффекте Холла типа ACS712 и энкодера типа E40S6-1000-3-T-24) с аналого-цифровым преобразователем L-Card.

Наведена конструктивна розробка окремих елементів кінематичної схеми станда статичних навантажень. На основі експериментально знятих залежностей для швидкості і струму двигуна при пуску, на холостому ходу і під навантаженням, і аналітично визначених методом послідовних ітерацій статичної механічної характеристики, визначені основні параметри станду. Були отримані значення моменту власних втрат привода, підтверджено паспортне значення моменту інерції двигуна. Визначено час роботи на холостому ходу при розгоні і під навантаженням. Також була розроблена схема підключення периферійних пристроїв (датчика струму на ефекті Холла типу ACS712 та енкодера типу E40S6-1000-3-T-24) з аналого-цифровим перетворювачем L-Card.

A constructive development of individual elements of the kinematic scheme stand static loads is given here. On the basis of experimentally removed dependencies for speed and motor current during start-up, at idle and under load, and analytical determination of the method of successive iterations of a static mechanical characteristics, the main parameters of the stand. We were obtained torque drive own losses, ending the nameplate motor moment of inertia. Operating time at idle and during acceleration under load. There was also a scheme connecting peripheral devices (the current sensor using the Hall effect type and ACS712 encoder type E40S6-1000-3-T-24) analog-to-digital converter L-Card.

Лебедь В. Т.

д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЭСА ДГМА

Квашнин В. О.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА
v.kvashnin@mail.ru

Шаповал Д. А.

студент ДГМА

УДК 621.313

Лебедь В. Т., Квашнин В. О., Шаповал Д. А.

РАЗРАБОТКА ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ГЛАВНОГО ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА

Характерным требованием, предъявляемым к механизму подъема, является ограничение ускорения сверху для исключения динамического удара, получения рывка, а также динамического момента, не приводящего к разрыву троса или каната, с противоположной стороны величина ускорения должна ограничиваться процессом разгона и выхода на установившуюся скорость за конечное время, которое ограничивается плановой производительностью и временем отработки технологической операции.

Помимо этого типичным требованием к механизму подъема является осуществление процесса пуска, разгона до установившейся скорости и работа под нагрузкой, а также реверсирование и удержание груза в процессе опускания.

Поскольку система электропривода механизма подъема представляет собой двухмассовую систему, в которой вторая масса свободно передвигается и установка на нее каких-либо датчиков трудно реализуема, поэтому построение системы управления электроприводом и контроль параметров может осуществляться только по первой массе, а именно, электродвигателю.

Поскольку к электроприводу механизма подъема не предъявляют особых требований к точности перемещения и стабилизации скорости, то реализуемая система управления электроприводом может быть осуществлена на основе скалярной системы управления.

Таблица 1

Исходные данные механизма подъема

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Грузоподъемность	Q_n	т	5
Скорость подъема	U_n	м/с	0,2
Допустимое ускорение	a	м/с ²	0,5
Рабочий путь подъема (спуска)	H	м	20
Диаметр барабана лебедки	D_b	м	0,33
Масса барабана лебедки	Q_b	т	0,29
КПД механизма	η	%	85
Маховый момент муфты с тормозным шкивом	J_M	кг/м ²	1,85
Передаточное число редуктора	U_p		41,3
Кратность полиспаста	P		2
Тип двигателя	АД		
Способ торможения	Противовключение		

Таблица 2

Паспортные данные двигателя 5АИ160М6

Параметр	Размерность	Значение
Тип двигателя		5АИ160М6
Мощность электродвигателя	кВт	15
Частота вращения	об/мин	970
Ток статора	А	33
cosφ		0,81
КПД	%	89
Ток ротора	А	37
Напряжение между кольцами ротора	В	260
Максимальный момент	Нм	312
Момент инерции ротора	кг·м ²	0,075

Целью работы являлась разработка динамической модели системы управления частотным электроприводом, обеспечивающая подъем груза на определенную высоту при его транспортировке.

Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие задачи:

- определение требований, предъявляемых к механизму подъема в целом и его электроприводу в частности;
- разработка и построение структурной блок-схемы системы электропривода, обрабатывающей перемещение;
- определение параметров и коэффициентов модели электропривода механизма подъема, реализующей скалярный принцип управления;
- построение динамической модели электропривода с использованием пакета Matlab Simulink;
- обработка полученных данных и их анализ.

Метод пространственных векторов [1, 2] позволяет записать систему уравнений движения двухфазной обобщенной электрической машины в единой системе координат, которая вращается с произвольной скоростью ω_k в координатной плоскости α, β :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\alpha} + \frac{L_m R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\alpha}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\beta} + \frac{L_m R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\alpha} - \frac{L_1 R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\alpha} - z_n \omega \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\beta} - \frac{L_1 R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\beta} + z_n \omega \psi_{2\alpha}, \\ M = 1,5 z_n \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\psi_{2\alpha} \cdot \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}), \\ \omega = \frac{M - M_c}{J_1 p}. \end{array} \right. \quad (1)$$

В системе уравнений (1):

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ – проекции векторов напряжений статора на координатные оси α, β ;

$\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – проекции векторов потокосцеплений статора и ротора на координатные оси α, β ;

L_1, L_2 – индуктивность статора и ротора соответственно;

L_m – коэффициент взаимной индукции.

В системе уравнений (1) выразим токи статора через потокосцепления ротора с учетом уравнений:

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = L_1 \cdot i_{1\alpha} + L_m \cdot i_{2\alpha}, \\ \psi_{1\beta} = L_1 \cdot i_{1\beta} + L_m \cdot i_{2\beta}, \\ \psi_{2\alpha} = L_2 \cdot i_{2\alpha} + L_m \cdot i_{1\alpha}, \\ \psi_{2\beta} = L_2 \cdot i_{2\beta} + L_m \cdot i_{1\beta}. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда модель асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором в потокосцеплениях ротора и токах статора будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} U_{1\alpha} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} i_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt}, \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} U_{1\beta} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} i_{1\beta} - \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt}, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \psi_{2\alpha} + \frac{L_m R_2}{L_2} i_{1\alpha} - z_n \omega \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \psi_{2\beta} + \frac{L_m R_2}{L_2} i_{1\beta} + z_n \omega \psi_{2\alpha}, \\ M = 1,5 z_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - i_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}), \\ \omega = \frac{M - M_c}{J_1 p}. \end{cases} \quad (3)$$

Найдем необходимые параметры для построения математической модели АД привода главного подъема [3–5]:

- амплитудное напряжение:

$$U_m = U_\phi \cdot \sqrt{2} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 311 \text{ В}; \quad (4)$$

- номинальное скольжение:

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0,03; \quad (5)$$

- критическое скольжение:

$$s_k = (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}) s_n = (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) 0,03 = 0,125; \quad (6)$$

- номинальный момент:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{15000}{101} = 148,5 \text{ Нм}; \quad (7)$$

- максимальный момент:

$$M_k = \lambda_k M_n = 2,2 \cdot 148,5 = 326,7 \text{ Нм}; \quad (8)$$

- максимальный ток статора:

$$I_k = 7 \cdot I_H = 7 \cdot 33 = 231 \text{ А}; \quad (9)$$

- активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = 1,5 \cdot \frac{U_\phi (1 - S_H)}{C_1 (1 + \frac{C_1}{S_K}) \cdot \sqrt{3} \cdot I_H \cdot \cos \phi \cdot \eta} =$$

$$= \frac{1,5 \cdot 220 (1 - 0,03)}{1,125 (1 + \frac{1,125}{0,125}) \cdot \sqrt{3} \cdot 33 \cdot 0,81 \cdot 0,89} = 0,69 \text{ Ом}; \quad (10)$$

- активное сопротивление ротора:

$$R_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot U_H \cdot \cos \phi \cdot \eta}{(1 - S_H) I_k^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 33 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,89}{(1 - 0,03) \cdot 231^2} = 0,0584 \text{ Ом}; \quad (11)$$

- полное индуктивное сопротивление статора и ротора:

$$L_1 = L_2 = \frac{2 \cdot U_\phi}{2\pi f_H I_H (\sqrt{1 - \cos^2 \phi} - \cos \phi \cdot \frac{S_H}{S_K})} =$$

$$= \frac{2 \cdot 220}{2\pi \cdot 50 \cdot 33 (\sqrt{1 - 0,81^2} - 0,81 \cdot \frac{0,03}{0,125})} = 0,11 \text{ Гн}; \quad (12)$$

- взаимное индуктивное сопротивление:

$$L_m = \frac{1}{2\pi f_H} \left[\frac{2 \cdot U_\phi}{I_H (\sqrt{1 - \cos^2 \phi} - \cos \phi \cdot \frac{S_H}{S_K})} - \frac{1}{\sqrt{(U_\phi \cdot \frac{I_k}{I_H})^2 - (R_1 + R_2)^2}} \right]$$

$$L_m = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \times \left(\frac{2 \cdot 220}{33 (\sqrt{1 - 0,81^2} - 0,81 \cdot \frac{0,03}{0,125})} - \frac{1}{\sqrt{(220 \cdot 7)^2 - (0,69 + 0,0584)^2}} \right) = 0,10987 \text{ Гн} \quad (13)$$

С учетом рассчитанных параметров, система уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = 3848,4 \cdot U_{1\alpha} - 2655,4 \cdot i_{1\alpha} - 3843,9 \cdot \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt}, \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = 3848,4 \cdot U_{1\beta} - 2655,4 \cdot i_{1\beta} - 3843,9 \cdot \frac{d\psi_{2\beta}}{dt}, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -0,531 \cdot \psi_{2\alpha} + 0,05833 \cdot i_{1\alpha} - 3 \cdot \omega \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -0,531 \cdot \psi_{2\beta} + 0,05833 \cdot i_{1\beta} + 3 \cdot \omega \psi_{2\alpha}, \\ M = 4,495 \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - i_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}), \\ \omega = \frac{M}{0,075 \cdot p}. \end{cases} \quad (14)$$

На основе математического описания получена структурная схема, представленная на рис. 1.

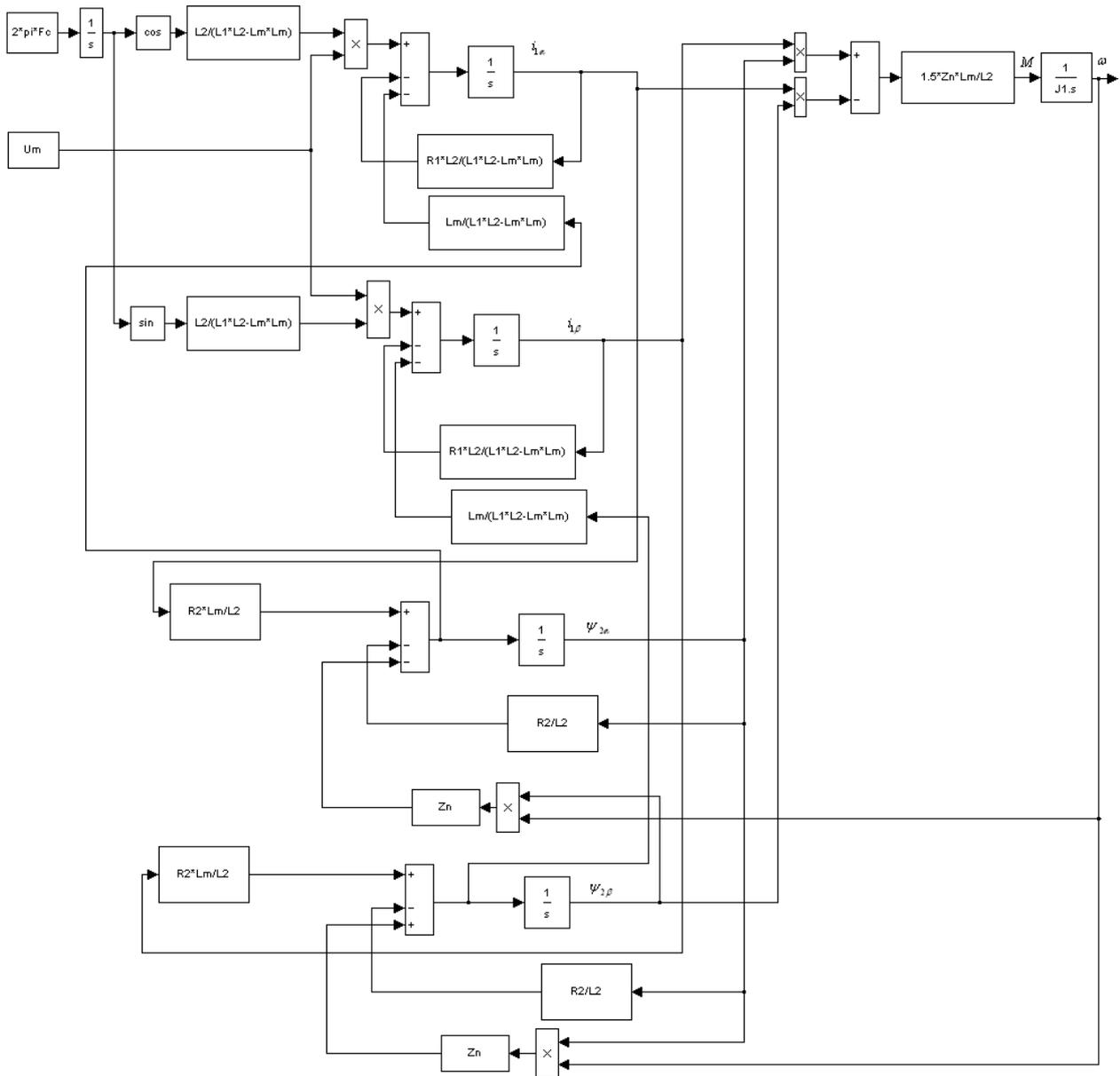


Рис. 1. Структурная схема асинхронного двигателя

На основе структурной схемы была построена математическая модель двигателя в пакете Matlab Simulink, представленная на рис. 2. Результаты моделирования переходных процессов пуска и наброса нагрузки приведены на рис. 3, 4.

Для расчёта регуляторов [6, 7] и работы системы регулирования принимаем максимальное значение напряжения управления, равное $U_{y\max} = 10$ В.

Передаточная функция частотного преобразователя:

$$W_{mn}(p) = \frac{K_{mn}}{\tau p + 1} = \frac{5}{0,005 p + 1}, \quad (15)$$

где $K_{mn} = \frac{f_c}{U_{y\max}} = \frac{50}{10} = 5(Bc)^{-1}$, τ – постоянная времени преобразователя частоты:

$$\tau = \tau_b + \tau_\phi + T_{oy} = 0,005.$$

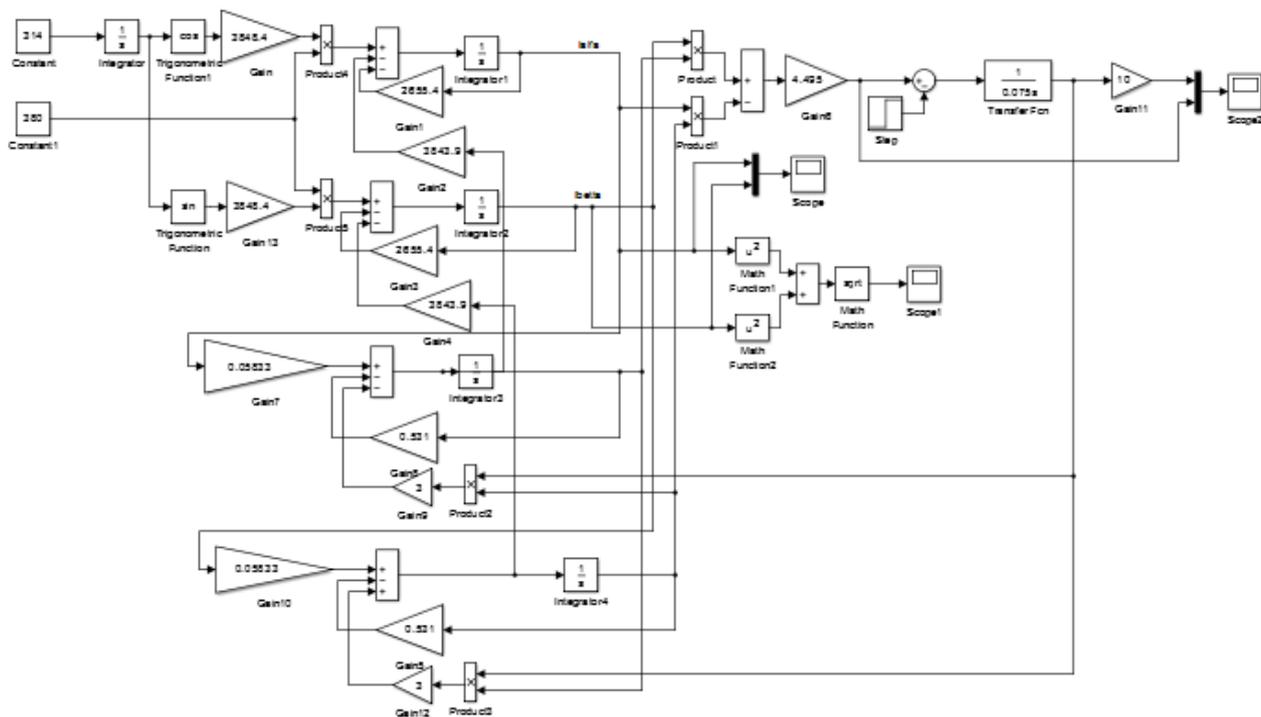


Рис. 2. Математическая модель двигателя в Matlab Simulink

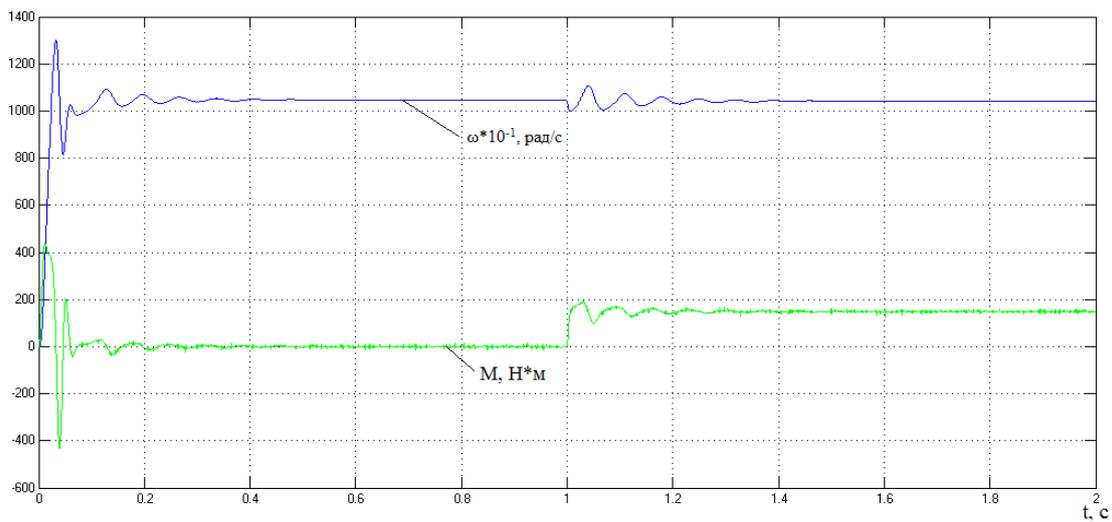


Рис. 3. Переходная характеристика угловой скорости и момента на валу двигателя

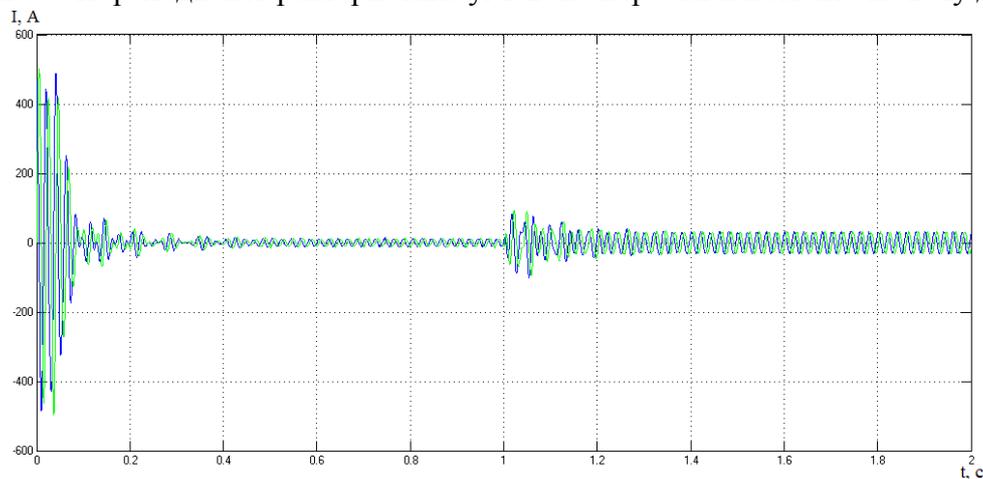


Рис. 4. Переходная характеристика фазного тока двигателя

Коэффициент передачи преобразователя частоты:

$$k_{\Pi} = 2 \cdot \pi = 6,28. \quad (16)$$

Вычислим коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_c = \frac{U_3}{\omega_0} = \frac{10}{104,7} = 0,0955 \text{ В} \cdot \text{с}. \quad (17)$$

Определим коэффициент обратной связи по положению:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\max}}{\Delta_{\max}} = \frac{10}{2\pi n} = \frac{10}{2\pi n} = \frac{10}{2\pi \cdot 826} = 0,00193 \text{ В/рад}, \quad (18)$$

где n – количество витков на валу двигателя: $n = U_p \cdot \frac{H}{\pi \cdot D_6} = 41,3 \cdot \frac{20}{3,14 \cdot 0,33} = 826$ вит-

ка необходимо намотать для полного подъема.

В системе управления используем ПИД-регулятор скорости системы регулирования положения, что исключает статическую и динамическую ошибку регулирования.

Следовательно, передаточная функция регулятора скорости примет вид:

$$W_{pc}(p) = K_{pc} \cdot \frac{(\tau \cdot p + 1)(T_e p + 1)}{4 \cdot \tau \cdot p}, \quad (19)$$

где τ – некомпенсированная постоянная времени ЧП, T_e – компенсируемая электромагнитная постоянная времени, K_{pc} – коэффициент регулятора скорости.

$$K_{pc} = \frac{J_1}{\tau \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\text{тн}} \cdot \beta \cdot K_c} = \frac{0,075}{0,005 \cdot 5 \cdot 6,28 \cdot 49,93 \cdot 0,0955} = 0,1, \quad (20)$$

где $\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k} = \frac{2 \cdot 326,7}{104,7 \cdot 0,125} = 49,93 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

Тогда регулятор скорости имеет вид:

$$W_{pc}(p) = 0,001875p + 0,4 + \frac{5}{p}. \quad (21)$$

Структуру регулятора положения в системе подчинённого регулирования можно синтезировать на основе метода последовательной коррекции[8].

Системы регулирования положения с учётом модульного оптимума обеспечивает оптимальные показатели регулирования:

- коэффициент демпфирования $\zeta = 1$;
- перерегулирование $\sigma = 0$;

С учетом произведенных расчетов и функциональной схемы (рис.5) построим структурную схему электропривода механизма главного подъема представленную на рис.6. На основе структурной схемы была построена математическая модель системы электропривода в пакете Matlab Simulink представленную на рис. 7.

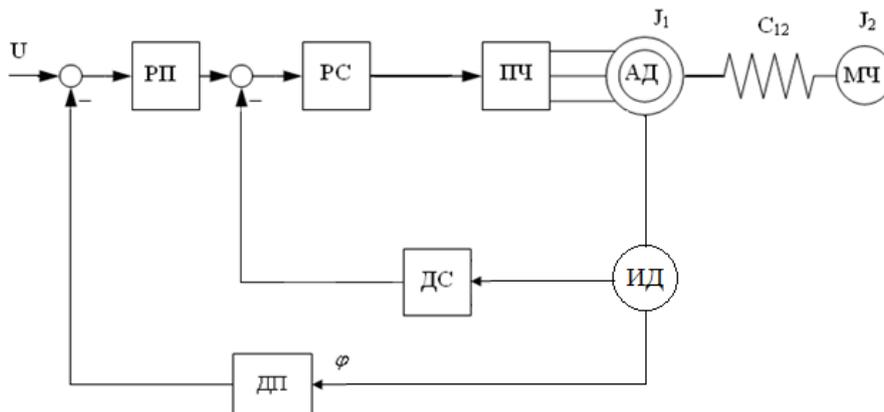


Рис. 5. Функциональная схема электромеханической системы

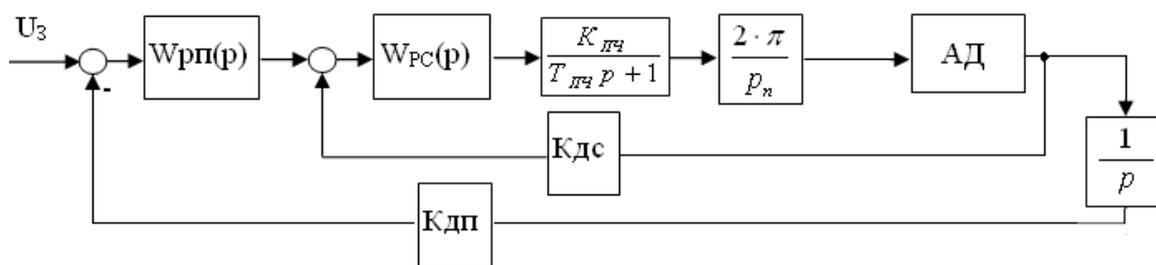


Рис. 6. Структурная схема электромеханической системы

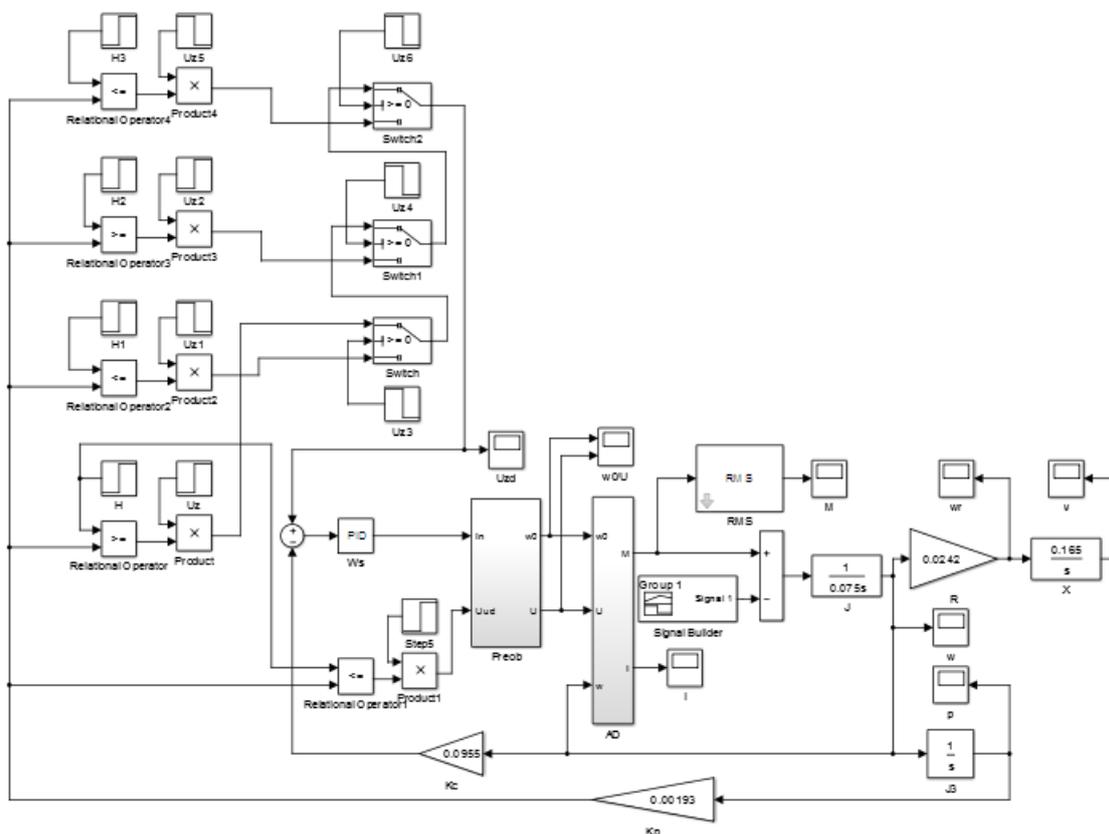


Рис. 7. Математическая модель системы электропривода в Matlab Simulink

На схеме (рис. 7) формирование сигнала задания производится с помощью блоков сравнения и переключения. Двигатель представлен в виде подсистемы AD, в которую входит математическая модель двигателя, представленная на рис. 2. Блок преобразователя частоты представлен на рис. 8. Результаты моделирования переходных процессов пуска и остановки после полного подъема приведены на рис. 9–14.

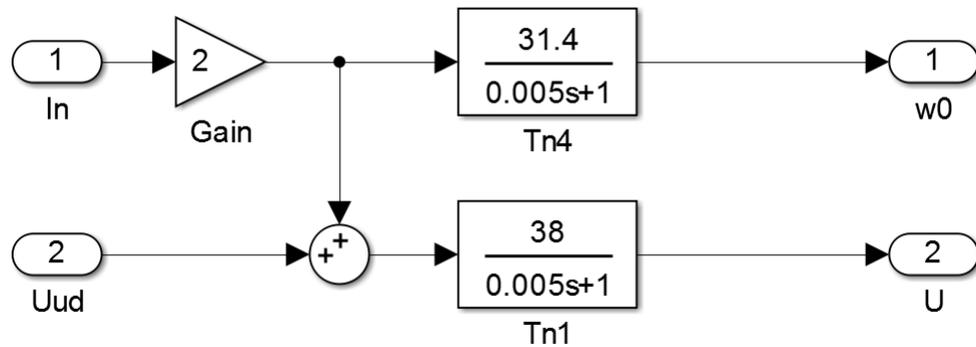


Рис. 8. Математическая модель преобразователя частоты в Matlab Simulink

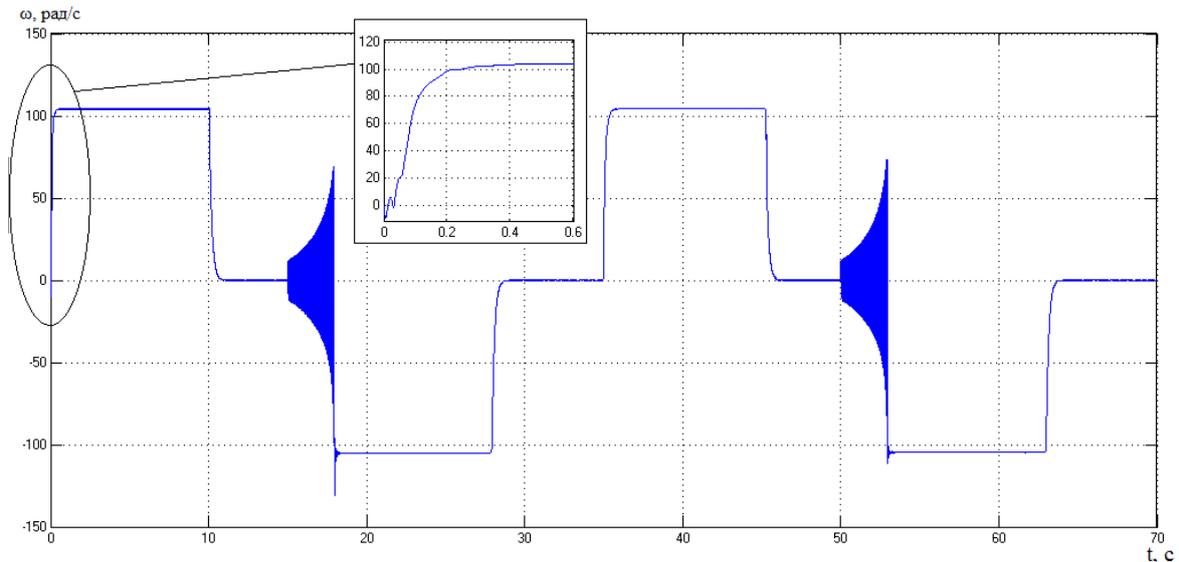


Рис. 9. Переходная характеристика угловой скорости на валу двигателя

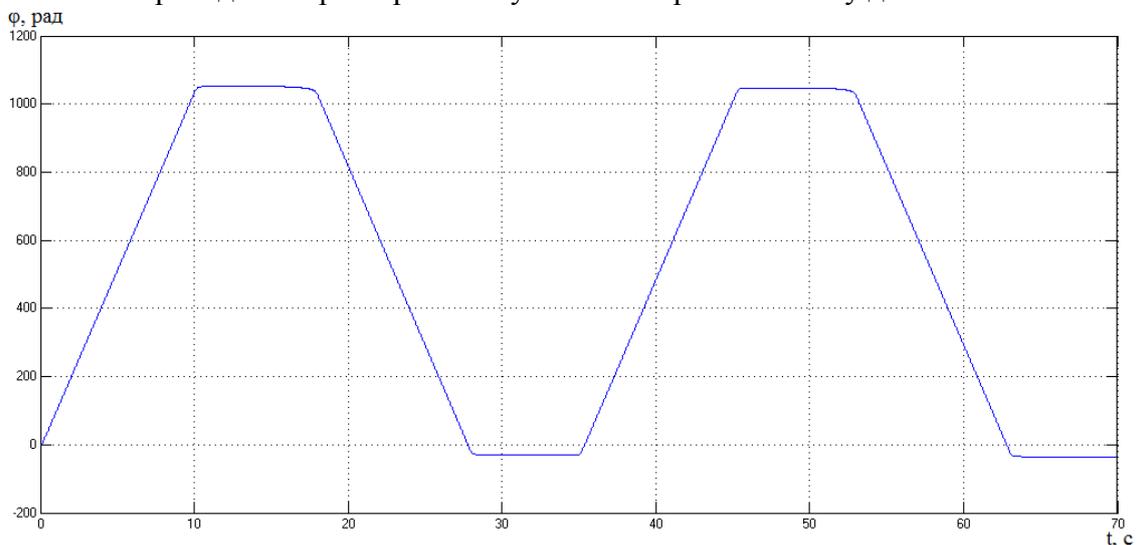


Рис. 10. Переходная характеристика угла перемещения на валу двигателя

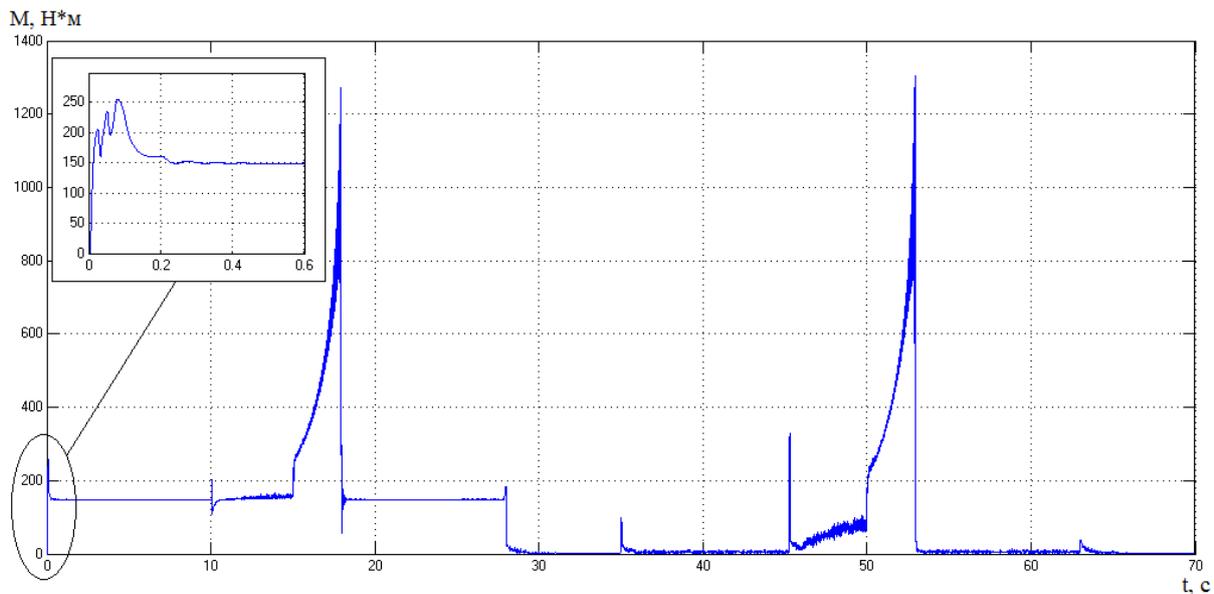


Рис. 11. Переходная характеристика упругого момента

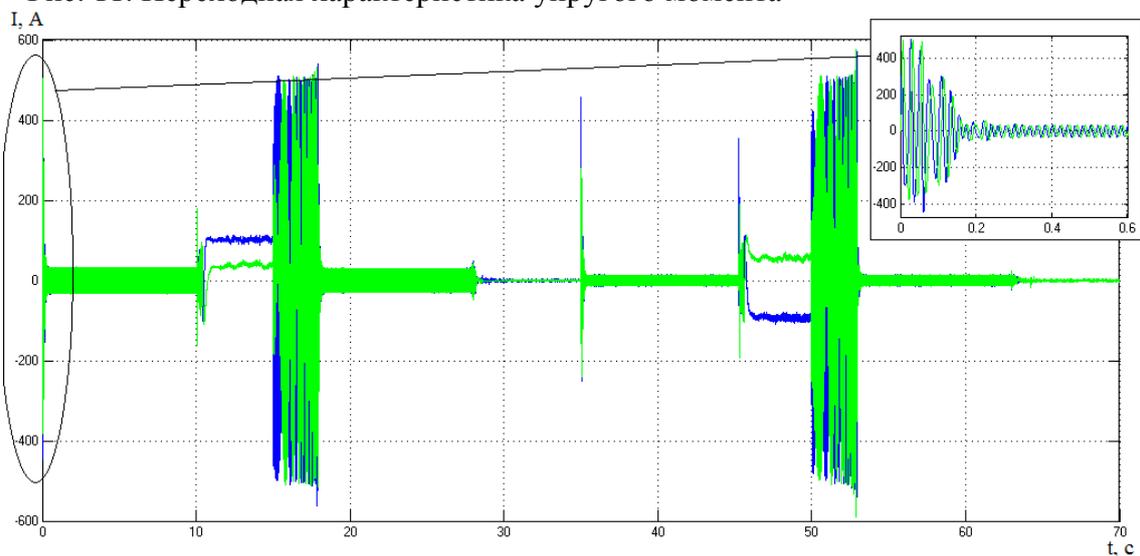


Рис. 12. Переходная характеристика фазного тока двигателя

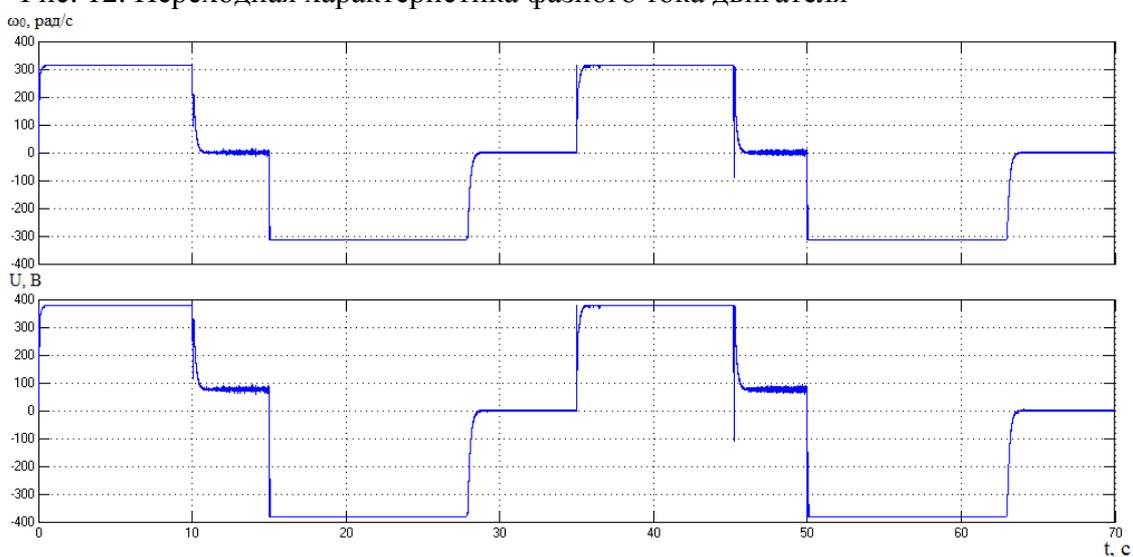


Рис. 13. Переходная характеристика частоты и амплитуды напряжения при законе управления U/f

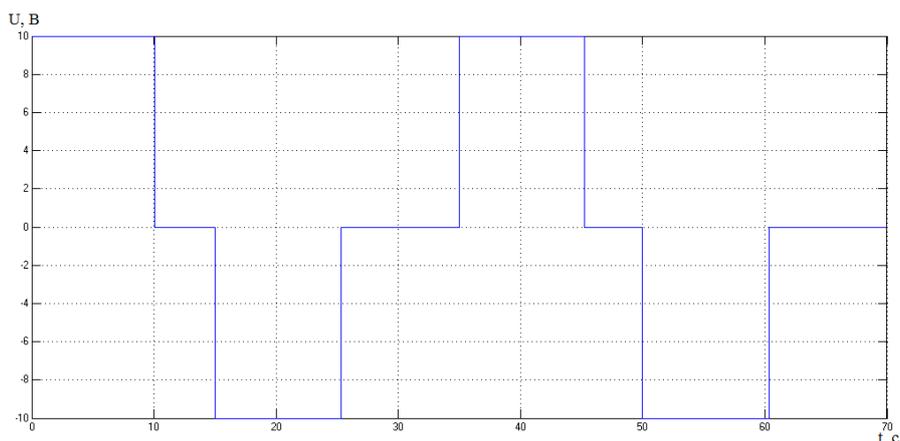


Рис. 14. Переходная характеристика сигнала задания

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что модель системы частотного электропривода с PID регулятором в канале скорости работоспособна во всех режимах работы механизма подъема, при этом настройки PID-регулятором в канале скорости обеспечивают желаемые параметры качества регулирования и управления процессом пуска, подъема, удержания и опускания груза.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате выполненной модернизации привода главного подъема, были аналитически получены параметры схемы замещения двигателя и выполнено моделирование системы управления электроприводом в пакете Matlab Simulink, с помощью которого были для электропривода определены его статические и динамические параметры:

- время разгона привода под нагрузкой $t_{разг} = 0,6$ с;
- установившееся значение скорости работы привода под нагрузкой $\omega_{нагр} = 104,5$ рад/с;
- момент сопротивления работы привода под нагрузкой $M_c = 148,5$ Нм;
- путь, проходимый механизмом подъема привода $S = 4$ м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусиенко Ю.Н. Разработка и исследование двухфазной динамической модели асинхронного электропривода / Ю. Н. Мусиенко, В.О. Квашинин // Вісник кафедри «Електротехніка» за підсумками наукової діяльності студентів – Донецьк, ДонНТУ, 2008 – С. 97–99.
2. Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – Д. : Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
3. Квашинин В. О. Методика аналитического определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя / В. О. Квашинин // Вісник: Східноукраїнського національного університету: науковий журнал. – Луганськ, 2000. – Випуск №8(30). – С. 54–59.
4. Методика аналитического определения характеристик асинхронного двигателя / В.О. Квашинин // Проблемы создания новых машин и технологий Сборник научных трудов. – Кременчугский государственный политехнический университет: КГПИ, 2000. – Вып. 1. – №8. – С. 143–145.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Учебн. пособие. – СПб.: Корона Принт, 2001. – 320 с.
6. Панкратов А. І. Системи керування електроприводами: Навч. Посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами». – Краматорськ : ДДМА, 2007. – 228 с.
7. Задорожний Н. А. Анализ электромеханического демпфирующего действия в электроприводах с вязким трением и упругим механическим звеном / Н.А. Задорожний, В.Д. Земляков, А.Г. Ровенский // Электричество. – 1985. – №5. – 83 с.
8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.