

DOI: 10.17516/1999-494X-0419

УДК 62–83:621.316.71

Modal Control of Asynchronous Electric Drive for a Trolley of a Bridge Crane with Observing Device

Alexander N. Pakhomov*,
Aleksandr A. Fedorenko and Pyotr N. Chertykov
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 01.07.2022, received in revised form 10.08.2022, accepted 18.08.2022

Abstract. Purpose of the work: development of a modal control system for an electric drive for moving a trolley of a bridge crane with damping of load vibrations. As an object of research, a system consisting of an asynchronous controlled electric drive, an overhead crane trolley, suspension and load is considered. Research methods: methods of the theory of automatic control, including methods of operator calculus and modal control, were used to achieve this goal. Numerical studies of processes in the control system under development are performed in the MATLAB computing environment (SIMULINK application software package). Results of the work: the method and structure of the system of automatic suppression of vibrations of a load freely suspended on a rope based on a modal speed controller and an observing device are proposed. A modal regulator and an observer of the speed of cargo movement have been developed, graphs of transients are shown that show the efficiency of the control system.

Keywords: modal control, electric trolley drive, overhead crane, transient, observing device.

Citation: Pakhomov, A.N., Fedorenko, A.A., Chertykov, P.N. Modal control of asynchronous electric drive for a trolley of a bridge crane with observing device. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(5), 583–592. DOI: 10.17516/1999-494X-0419

Модальное управление асинхронным электроприводом тележки мостового крана с наблюдающим устройством

А. Н. Пахомов, А. А. Федоренко, П. Н. Чертыков
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Цель работы: разработка системы модального управления для электропривода перемещения тележки мостового крана с демпфированием колебаний груза. В качестве объекта исследования рассмотрена система, состоящая из асинхронного управляемого электропривода, тележки мостового крана, подвески и груза. Методы исследования: для достижения поставленной цели использовались методы теории автоматического управления, в том числе методы операторного исчисления и модального управления. Численные исследования процессов в разрабатываемой системе управления выполнены в вычислительной среде MATLAB (пакет прикладных программ SIMULINK). Результаты работы: предложены метод и структура системы автоматического подавления колебаний груза, свободно подвешенного на канате, на основе модального регулятора скорости и наблюдающего устройства. Разработаны модальный регулятор и наблюдатель скорости перемещения груза. Приведены графики переходных процессов, которые показывают эффективность работы системы управления.

Ключевые слова: модальное управление, электропривод тележки, мостовой кран, переходный процесс, наблюдающее устройство.

Цитирование: Пахомов, А. Н. Модальное управление асинхронным электроприводом тележки мостового крана с наблюдающим устройством / А. Н. Пахомов, А. А. Федоренко, П. Н. Чертыков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(5). С. 583–592. DOI: 10.17516/1999-494X-0419

Введение

В качестве грузоподъемных механизмов на промышленных предприятиях широко используют мостовые краны. При перемещении тележки и моста крана неизбежно возникает раскачивание подвешенного груза. Около 20 % времени полного цикла перегрузочных операций затрачивается на ожидание завершения колебаний груза, что существенно снижает производительность и усложняет работу оператора. Кроме того, раскачивание груза приводит к увеличению динамических нагрузок на приводы и металлические конструкции крана [1].

В данной статье рассматривается способ подавления колебаний груза при помощи модального управления электроприводом перемещения тележки мостового крана с использованием наблюдателя. Определение структуры системы автоматического управления скоростью груза рассматривается как двухэтапный процесс. На первом этапе синтезируется модальный регулятор в предположении, что все переменные состояния системы доступны измерению. На втором – синтезируется и включается в структуру системы наблюдатель переменных труднодоступных непосредственному контролю.

Синтез модального регулятора

Для конкретности в качестве объекта исследования выберем электропривод перемещения тележки мостового крана с подвешенным грузом, однако всё изложенное справедливо и для электроприводов перемещения моста и подъёма груза.

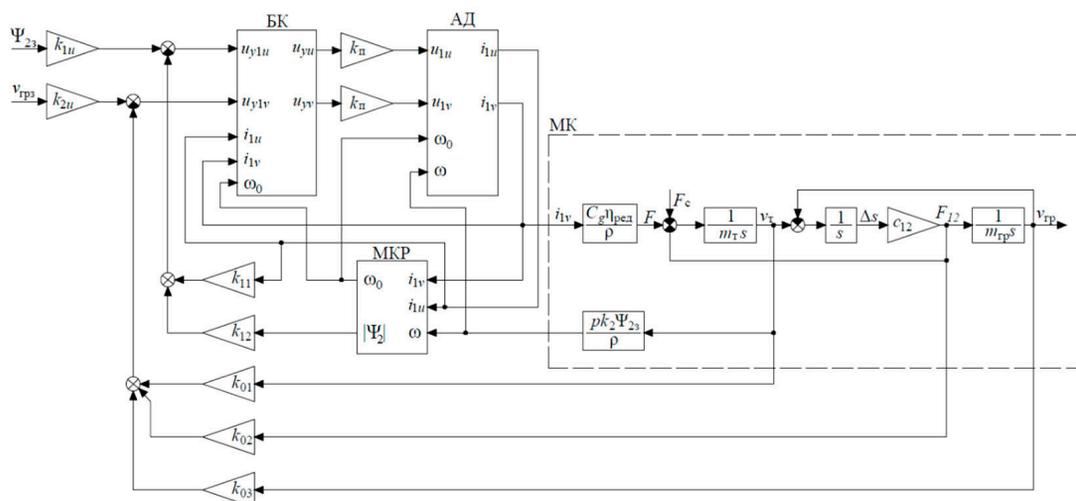


Рис. 1. Структурная схема электропривода перемещения тележки с грузом с модальным управлением

Fig. 1. Block diagram of an electric drive for moving a truck with a load with modal control

Структурная схема системы автоматического управления скоростью перемещения груза (рис. 1) составлена в предположении, что все переменные состояния объекта исследования доступны измерению. В основе этой структурной схемы лежит структурная схема системы векторного частотного управления скоростью асинхронного двигателя с модальным регулятором, рассмотренная в [2].

На рис. 1 блоки АД, БК, МКР – это структурные схемы асинхронного двигателя (АД) (в переменных I_2 - Ψ_2), блока компенсации внутренних перекрестных связей структурной схемы АД и, соответственно, структурная схема электромагнитного контура ротора (см. [2, 3]).

Коэффициенты обратных связей k_{11} , k_{12} и k_{01} , k_{02} , k_{03} в совокупности с соответствующими сумматорами и узлами сравнения образуют двухканальный модальный регулятор. Первый канал (k_{11} , k_{12}) обеспечивает стабилизацию потокосцепления ротора АД, а второй (k_{01} , k_{02} , k_{03}) – формирует диаграмму скорости перемещения груза $v_{тр}$. Коэффициенты k_{1u} и k_{2u} согласуют сигналы задания потокосцепления ротора Ψ_{23} и скорости перемещения груза $v_{тр3}$ с их реальными выходными значениями Ψ_2 и $v_{тр}$. Преобразователь частоты по каждому из каналов управления учтён безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_n .

Механическая часть объекта управления, которая состоит из тележки с приведенной к валу двигателя массой m_t и груза массой $m_{тр}$, подвешенного на канате длиной h , на рис. 1 представлена структурной схемой (блок МК) двухмассовой системы с упругой связью [4].

Здесь $C_g = 3pk_2\Psi_2/2$ – коэффициент связи электромагнитного момента с координатой i_{1v} вектора тока статора АД; p , k_2 – число пар полюсов АД и коэффициент электромагнитной связи ротора; $\eta_{ред}$ – КПД редуктора; ρ – радиус приведения угловой скорости двигателя к линейной скорости тележки; c_{12} – коэффициент упругой механической связи между массами тележки и груза; v_t – скорость перемещения тележки; $v_{тр}$ – скорость груза; F_c – сила, препятствующая передвижению тележки с грузом; F_{12} – сила, прикладываемая к грузу при его отклонении от вертикального положения; Δs – отклонение груза от вертикального положения.

Поскольку структурная схема объекта управления на рис. 1 отличается от рассмотренной в [2] только структурой механической части МК, то структура и процедура синтеза модального регулятора по каналу стабилизации потокосцепления Ψ_2 ротора АД идентичны рассмотренным в [2] и в настоящей работе не рассматриваются.

Канал же формирования скорости перемещения груза $v_{гр}$ отличается как структурой, так и набором переменных состояния. Рассмотрим синтез модального регулятора для этого канала.

Для рассматриваемого класса механизмов инерционность электромагнитных контуров АД многократно меньше инерционности механической части системы, поэтому представляется правильным на этапе синтеза его пренебречь. Тогда объект управления описывается следующей системой уравнений состояния [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_{\tau}}{dt} = \frac{k_{\pi}}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{C_g \eta_{\text{ред}}}{\rho m_{\tau}} i_{lv} - \frac{F_c}{m_{\tau}} - \frac{F_{12}}{m_{\tau}}; \\ \frac{dF_{12}}{dt} = c_{12}(v_{\tau} - v_{гр}); \\ \frac{dv_{гр}}{dt} = \frac{F_{12}}{m_{гр}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Этим уравнениям соответствуют матрицы параметров A и входа B :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{m_{\tau}} & 0 \\ c_{12} & 0 & -c_{12} \\ 0 & \frac{1}{m_{гр}} & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_{\pi}}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{C_g \eta_{\text{ред}}}{\rho m_{\tau}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда, с учётом структуры модального регулятора скорости груза $v_{гр}$ (см. рис. 1), характеристический полином замкнутой по вектору состояния системы определяется выражением [5]:

$$Q(s) = |s \cdot E - (A - B \cdot K)|, \quad (2)$$

где $K = (k_{01} \quad k_{02} \quad k_{03})$ – матричный коэффициент модального регулятора; E – единичная матрица.

С учётом (1) выражение (2) равно:

$$Q(s) = \left| s \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{pmatrix} \cdot (k_{01} \quad k_{02} \quad k_{03}) \right) \right| = s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0,$$

$$\text{где } q_2 = \frac{k_{01} k_{\pi} C_g \eta_{\text{ред}}}{R_{\Sigma} \rho m_{\tau}}; \quad q_1 = \frac{k_{02} c_{12} k_{\pi} C_g \eta_{\text{ред}}}{R_{\Sigma} \rho m_{\tau}} + \frac{c_{12} (m_{гр} - m_{\tau})}{m_{гр} m_{\tau}}; \quad q_0 = \frac{(k_{03} - k_{01}) c_{12} k_{\pi} C_g \eta_{\text{ред}}}{R_{\Sigma} \rho m_{\tau} m_{гр}}.$$

Выбрав в качестве желаемого характеристический полином фильтра Баттерворта третьего порядка

$$D(s) = s^3 + 2\omega_{\sigma} s^2 + 2\omega_{\sigma}^2 s + \omega_{\sigma}^3, \quad (3)$$

обеспечивающий перерегулирование $\sigma = 7,1\%$ и время переходного процесса $\tau_{\text{пн}} = 5,9\omega_6^{-1}$ [5], и приравняв его к уравнению (3), определим коэффициенты модального регулятора:

$$k_{01} = \frac{2\omega_6 R_3 \rho m_T}{k_{\text{п}} C_g \eta_{\text{ред}}}; k_{02} = \frac{R_3 \rho [2\omega_6^2 m_{\text{тр}} m_T - c_{12} (m_{\text{тр}} - m_T)]}{m_{\text{тр}} c_{12} k_{\text{п}} C_g \eta_{\text{ред}}};$$

$$k_{03} = \frac{R_3 \rho m_T \omega_6 (m_{\text{тр}} \omega_6^2 + 2c_{12})}{c_{12} k_{\text{п}} C_g \eta_{\text{ред}}}.$$

Для численных расчётов использованы параметры АД *RA250M2* ($P_{\text{н}} = 55$ кВт, $n_{\text{н}} = 2950$ об/мин). Приведенная масса тележки, масса груза и длина каната приняты равными: $m_T = 133,5$ т; $m_{\text{тр}} = 150$ т; $h = 30$ м. Базовая частота, определяющая быстродействие системы, выбрана из условия ограничения бросков переменных состояния на допустимом уровне: $\omega_6 = 1,18$ с⁻¹. При этом численные значения коэффициентов модального регулятора: $k_{01} = 0,135$; $k_{02} = 2,45 \cdot 10^{-6}$; $k_{03} = 0,153$.

Графики изменения скорости груза $v_{\text{гр}}$ и скорости тележки $v_{\text{т}}$ при $\Psi_2 = \text{const}$ и ступенчатом задании $v_{\text{грз}}$ приведены на рис. 2.

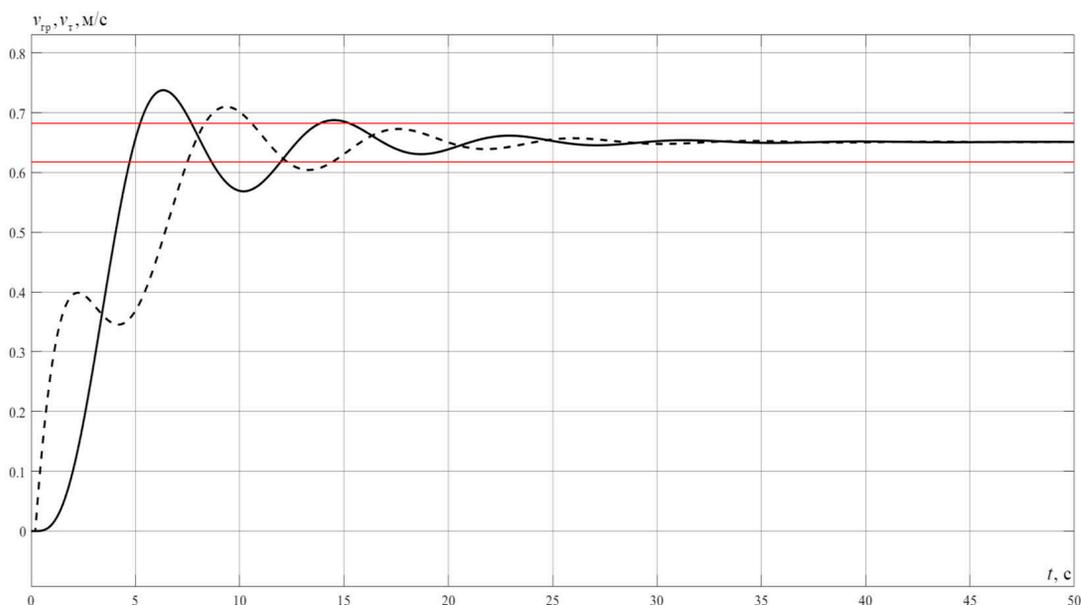


Рис. 2. Переходные процессы скорости груза и тележки (где сплошная линия – скорость груза $v_{\text{гр}}$, пунктирная – скорость тележки $v_{\text{т}}$)

Fig. 2. Transients of the speed of the load and the trolley (where the solid line is the speed of the load $v_{\text{гр}}$, the dotted line is the speed of the trolley $v_{\text{т}}$)

Как видно, рассматриваемая система автоматического управления скоростью перемещения груза обеспечивает переходный процесс, близкий к желаемому ($t_{\text{пн}} = 15$ с, $\sigma_{\text{гр}} = 13,19\%$), кардинально устраняя при этом его колебательность – для сравнения можно взять результаты работы [6].

Синтез наблюдающего устройства

Синтез модального регулятора осуществлён в предположении, что все переменные состояния системы доступны измерению (наблюдаемы), однако сила F_{12} и скорость перемещения груза $v_{гр}$ таковыми не являются. Поэтому определим их с помощью наблюдающего устройства (НУ).

В самом общем случае математическая модель наблюдателя в векторно-матричной форме имеет вид [5]:

$$\hat{X}(t) = A\hat{X}(t) + BU(t) + G(Y(t) - C\hat{X}(t)). \quad (4)$$

Здесь переменные $\hat{X}(t)$ – это переменные, определяемые наблюдателем; $Y(t)$ – переменные, доступные измерению; $U(t)$ – входные переменные объекта; A – матрица параметров объекта; B – матрица входов объекта; C – матрица размерности ($r \times n$) выходов объекта, доступных измерению; G – матрица размерности ($n \times r$) коэффициентов регулятора НУ.

Уравнение (4) в операторной форме имеет вид:

$$s\hat{X}(s) = (A - GC)\hat{X}(s) + BU(s) + G(Y(s)).$$

Ему соответствует характеристический полином:

$$N(s) = |sE - (A - GC)|.$$

При синтезе НУ будем считать известным задающий сигнал u_{yv} напряжения на входе преобразователя и доступным измерению сигнал скорости перемещения тележки $v_{т}$.

Переменные, не доступные измерению и определяемые наблюдателем: проекция тока статора i_{1v} , сила, прикладываемая к грузу при его отклонении от вертикального положения, F_{12} и скорость перемещения груза $v_{гр}$.

Тогда, согласно [2, 3] и структурной схеме рис. 1 системы автоматического управления, уравнения наблюдателя в скалярной форме будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\hat{i}_{1v}}{dt} = \frac{k_n}{R_3 T_3} u_{yv} - \frac{1}{T_3} \hat{i}_{1v} - \frac{k_2 p \Psi_{23}}{R_3 T_3 \rho} \hat{v}_{т} + g_1 (v_{т} - \hat{v}_{т}); \\ \frac{d\hat{v}_{т}}{dt} = \frac{C_g \eta_{ред}}{\rho m_{т}} \hat{i}_{1v} - \frac{F_c}{m_{т}} - \frac{\hat{F}_{12}}{m_{т}} + g_2 (v_{т} - \hat{v}_{т}); \\ \frac{d\hat{F}_{12}}{dt} = c_{12} (\hat{v}_{т} - \hat{v}_{гр}) + g_3 (v_{т} - \hat{v}_{т}); \\ \frac{d\hat{v}_{гр}}{dt} = \frac{\hat{F}_{12}}{m_{сп}} + g_4 (v_{т} - \hat{v}_{т}). \end{array} \right.$$

Отметим, что здесь в модели объекта наблюдения учтена и электромагнитная инерция обмоток АД.

Таким образом, для рассматриваемого объекта матрица-столбец коэффициентов наблюдателя равна:

$$G = (g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad g_4)^T.$$

Матрица-строка переменных, доступных измерению:

$$C = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0).$$

Матрица динамики:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_3} & -\frac{k_2 p \Psi_{23}}{R_3 T_3 \rho} & 0 & 0 \\ \frac{C_g \eta_{\text{ред}}}{\rho m_T} & 0 & -\frac{1}{m_T} & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & -c_{12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{\text{п}}} & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Характеристический полином НУ определяется выражением:

$$N(s) = \begin{vmatrix} p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{vmatrix} - \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & g_1 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 \\ 0 & g_3 & 0 & 0 \\ 0 & g_4 & 0 & 0 \end{vmatrix} =$$

$$= s^4 + n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0,$$

$$\text{где } n_3 = g_2 + \frac{1}{T_3}; n_2 = \frac{g_1 C_g \eta_{\text{ред}}}{\rho m_T} + \frac{g_2}{T_3} - \frac{g_3}{m_T} + \frac{c_{12}(m_T + m_{\text{п}})}{m_T m_{\text{п}}} + \frac{k_2 p \Psi_{23} C_g \eta_{\text{ред}}}{R_3 T_3 \rho^2 m_T};$$

$$n_1 = \frac{g_2 c_{12}}{m_{\text{п}}} - \frac{g_3}{T_3 m_T} + \frac{g_4 c_{12}}{m_T} + \frac{c_{12}(m_{\text{п}} + m_T)}{T_3 m_{\text{п}} m_T}; n_0 = \frac{g_1 c_{12} C_g \eta_{\text{ред}}}{\rho m_T m_{\text{п}}} + \frac{g_2 c_{12}}{T_3 m_{\text{п}}} + \frac{g_4 c_{12}}{T_3 m_T} + \frac{k_2 p \Psi_{23} C_g \eta_{\text{ред}} c_{12}}{R_3 T_3 \rho^2 m_T m_{\text{п}}}.$$

Выбрав в качестве желаемого характеристический полином четвертого порядка с настройкой на модульный оптимум:

$$D(s) = s^4 + 2,82\omega_6 s^3 + 4\omega_6^2 s^2 + 2,82\omega_6^3 s + \omega_6^4,$$

обеспечивающий перегулирование $\sigma = 6,2\%$ и время переходного процесса $\tau_{\text{пн}} = 7\omega_6^{-1}$ [5], и приравняв его полиному $N(s)$, определим коэффициенты матрицы G наблюдающего устройства:

$$g_1 = \frac{T_3^4 \omega_6^4 - 2,82 T_3^3 \omega_6^3 + 4 T_3^2 \omega_6^2 - 2,82 T_3 \omega_6 + 1 - R T_3^2 (1 + \Omega_{\text{п}}^2 T_3^2)}{a_{21} T_3^2 (1 + \Omega_{\text{п}}^2 T_3^2)}, \quad g_2 = 2,82 \omega_6 - \frac{1}{T_3};$$

$$g_3 = \frac{T_3^2 \omega_6^4 - 2,82 T_3 \omega_6^3 - 4 T_3^2 \omega_6^2 \Omega_{\text{п}}^2 + 2,82 T_3 \omega_6 \Omega_{\text{п}}^2 + \Omega_{\text{п}}^2 (1 + \Omega_{\text{п}}^2 T_3^2) + \Omega_{\text{п}}^4 T_3^2}{(1 + \Omega_{\text{п}}^2 T_3^2) / m_T};$$

$$g_4 = \frac{T_3 \omega_6^4 + 2,82 T_3^2 \omega_6^3 \Omega_{\text{п}}^2 - 4 T_3 \omega_6^2 \Omega_{\text{п}}^2 - 2,82 T_3^2 \omega_6 \Omega_{\text{п}}^4 + T_3 \Omega_{\text{п}}^4}{\Omega_{\text{п}}^2 (1 + \Omega_{\text{п}}^2 T_3^2)},$$

где $\Omega_{\text{п}} = \sqrt{c_{12} / m_{\text{п}}}$ и $\Omega_{\text{т}} = \sqrt{c_{12} / m_{\text{т}}}$ – резонансные частоты груза и тележки; $R = -a_{12} \cdot a_{21}$; $a_{12} = -k_2 p \Psi_{23} / (R_3 T_3 \rho)$ и $a_{21} = C_g \eta_{\text{ред}} / (\rho m_T)$ – коэффициенты матрицы динамики A (5).

Структурная схема синтезированного НУ приведена на рис. 3.

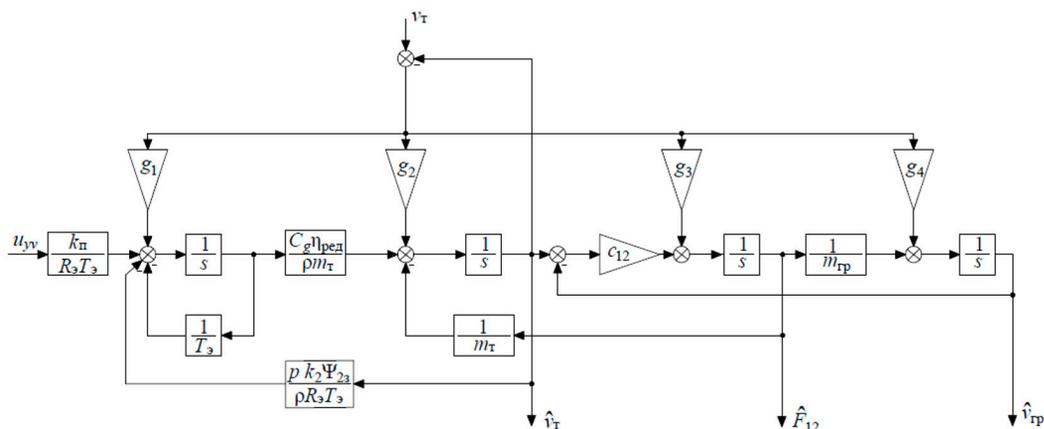


Рис. 3. Структурная схема синтезированного наблюдающего устройства

Fig. 3. Structural diagram of the synthesized observing device

Для наблюдателя значение ω_6 ограничивается только условиями помехозащищённости системы, поэтому для численных расчётов принимаем $\omega_6 = 100 \text{ с}^{-1}$. Тогда $g_1 = 3,14 \cdot 10^5$; $g_2 = -1,114$; $g_3 = -8,315 \cdot 10^5$; $g_4 = 224,537$.

Графики изменения скорости тележки и скорости груза в системе с наблюдателем представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Как видно из графиков, максимальная погрешность определения $\hat{v}_{\text{гр}}$ наблюдается на начальном этапе процесса, но она никак не влияет на процесс перемещения груза в целом. Про-

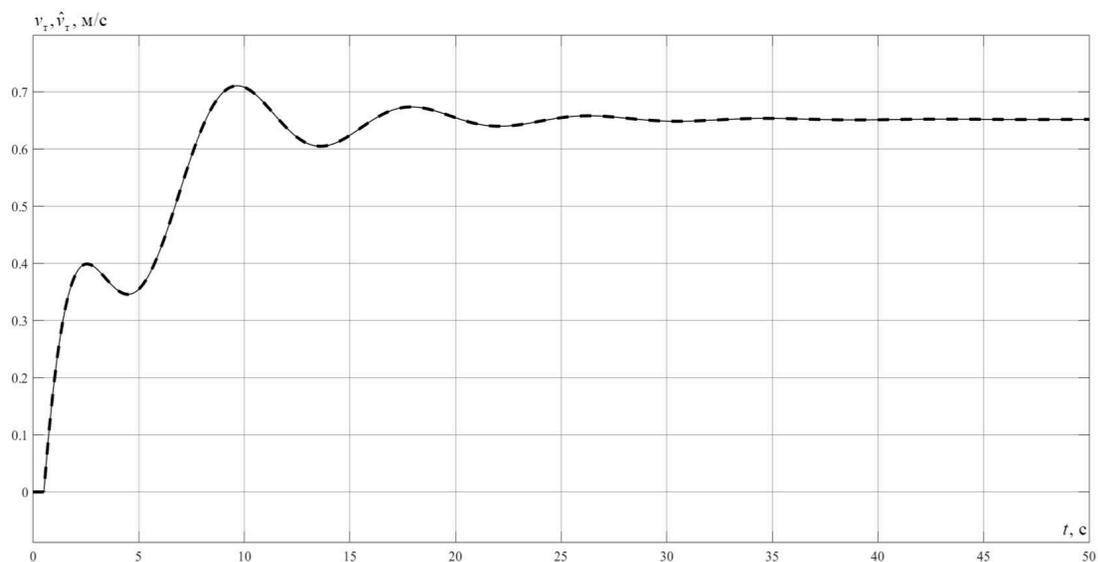


Рис. 4. Графики изменения скорости тележки (сплошная линия – скорость тележки \hat{v}_{τ} определяемая наблюдателем, пунктирная – реальная скорость тележки v_{τ})

Fig. 4. Graphs of the trolley speed change (solid line – the trolley speed \hat{v}_{τ} determined by the observer, dotted line – the real trolley speed v_{τ})

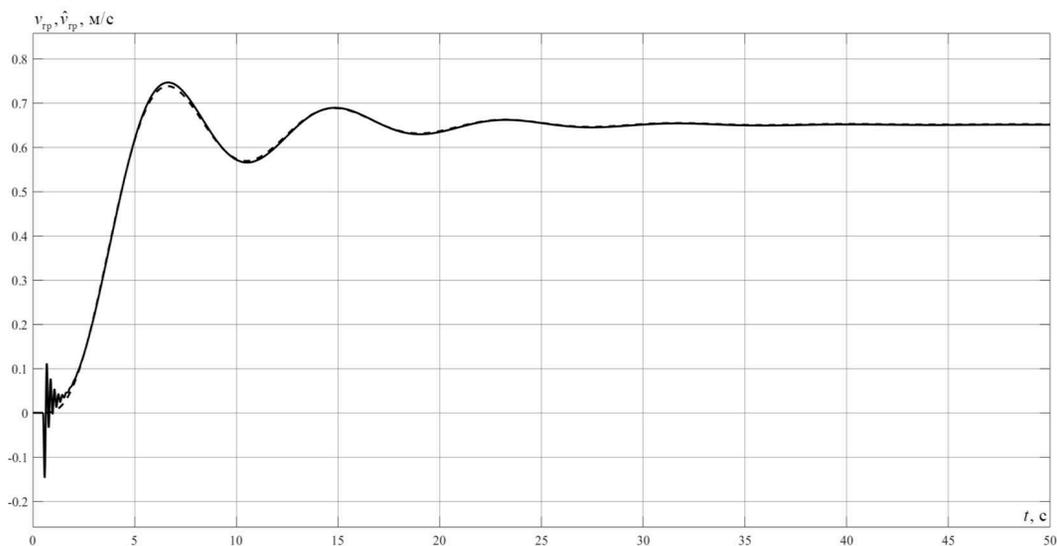


Рис. 5. Графики изменения скорости груза (сплошная линия – скорость груза \hat{v}_{gp} , определяемая наблюдателем, пунктирная – реальная скорость груза v_{gp})

Fig. 5. Graphs of changes in speed of the load (solid line – the speed of the load \hat{v}_{gp} determined by the observer, dotted line – the real speed of the load v_{gp})

цессы в замкнутой системе электропривода с НУ полностью совпадают с процессами в системе, построенной в предположении, что все переменные наблюдаемы (см. рис. 2).

Таким образом, предлагаемая система модального управления асинхронным электроприводом тележки мостового крана с использованием наблюдающего устройства позволяет решить проблему подавления колебаний подвешенного груза.

Для реализации предлагаемого наблюдателя требуется четыре интегратора и несколько усилителей. Он легко реализуется как аналоговыми, так и цифровыми электронными средствами. Достоинством такого наблюдателя является то, что он позволяет полностью оценить вектор переменных состояния электропривода.

Список литературы / References

[1] Мещеряков В.Н. *Динамика электромеханических систем подъемно-транспортных механизмов с асинхронным электроприводом*, Липецк: ЛГТУ, 2002. 120 [Meshcheryakov V.N. *Dynamics of electromechanical systems of hoisting and transport mechanisms with asynchronous electric drive*, Lipetsk: LGTU, 2002, 120 (in Russian)].

[2] Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление электроприводом переменного тока. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева*, 2011. 3(36). 70–74 [Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A. Modal control of asynchronous electric drive. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*, 2011, 3(36), 70–74 (in Russian)]

[3] Чертыков П.Н., Пахомов А.Н. Влияние перекрестных связей в системе асинхронного электропривода с модальным управлением. *Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XXXVIII междунар. науч.-практ. конф.*, 2020,

9(38). 17–23 [Chertykov P. N., Pakhomov A. N. Influence of cross-links in the system of asynchronous electric drive with modal control. *Scientific forum: Technical and physical and mathematical sciences: Sat. Art. based on materials of the XXXVIII int. scientific-practical. conf.*, 2020, 9(38), 17–23 (in Russian)]

[4] Брюханова Е. В., Пахомов А. Н. Система электропривода тележки грузоподъемного крана с модальным управлением. *Научный форум: технические и физико-математические науки. сб. ст. по материалам XLIII международной научно-практической конференции*. Москва, 2021. 59–64. [Bryukhanova E. V., Pakhomov A. N. Crane trolley electric drive system with modal control. *Scientific forum: technical and physical and mathematical sciences. collection of articles based on materials of the XLIII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2021, 59–64 (in Russian)]

[5] Кузовков Н. Т. *Модальное управление и наблюдающие устройства*, М.: Машиностроение, 1976, 184 [Kuzovkov N. T. *Modal control and observing devices*, Moscow, Mashinostroyeniye, 1976, 184 (in Russian)]

[6] Пахомов А. Н. Модернизация закона управления электроприводом перемещения тележки грузоподъемного крана. *Глобус: технические науки*, 2020, 3(34), 31–33 [Pakhomov A. N. Modernization of the law of control of the electric drive of the movement of the crane trolley. *Globus: technical sciences*, 2020, 3(34), 31–33 (in Russian)]