

Dyachenko Alexandr Alexandrovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: aleks@mvs.tsure.ru

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371689.

УДК 681.326.5 – 181.48:629.113

М.И. Монченко

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ МЕХАНИЗМОМ АВТОМОБИЛЯ

Рассмотрена математическая модель рулевого управления с электромеханическим усилителем руля, получено уравнение «вход-выход» объекта управления, осуществлен синтез двумерного устройства управления, обеспечивающего первый порядок астатизма и требуемое время регулирования для реализации на микроконтроллере, проведено моделирование переходных процессов.

Электромеханический усилитель; устройство управления.

M.I. Monchenko, A.R. Gaiduk

MICROPROCESSOR SYSTEM OF AUTOMOBILE STEERING GEAR CONTROL

The mathematical model of steering with an electromechanical booster is analyzed. The «input-output» equation is deduced. The synthesis of two-dimensional control device, providing the first order floating and required regulating time, is made to be realized on the basis of microcontroller. The modeling of the transition process is made.

Electromechanical steering booster; two-dimensional control device.

В работе рассматривается безредукторный усилитель рулевой колонки, состоящий из рулевого механизма со встроенным электродвигателем и соединяющего их упругого стержня – торсиона (рис. 1) [1].



Рис. 1. Общий вид электроусилителя руля

Функциональная схема рулевого управления с ЭМУР показана на рис. 2. Работа рассматриваемого рулевого управления протекает следующим образом. Водитель, прикладывая усилие к рулевому колесу, заставляет торсион скручиваться на некоторый угол. Система управления измеряет это угловое рассогласование и ЭМУР формирует вспомогательный момент на валу рулевого механизма. Благодаря

ря этому от водителя требуется значительно меньшее усилие, необходимое для поворота руля, чем при отсутствии усилителя, и управление автомобилем становится более комфортным.

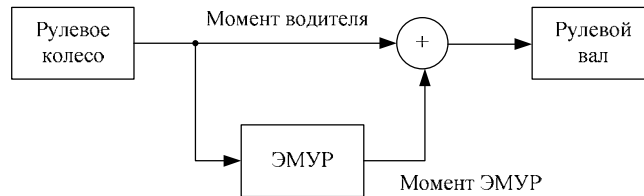


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

Работу ЭМУР можно представить структурной схемой, показанной на рис. 3. Микропроцессорный блок получает информацию о моменте, созданном водителем, через момент скручивания торсиона $M_{Т1}$ и формирует момент исполнительного электродвигателя $M_{Д}$ в соответствии с требованиями к функционированию системы.

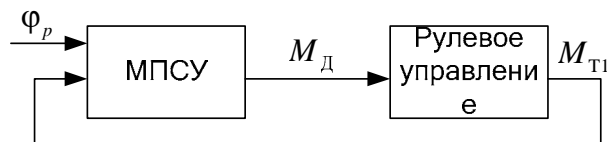


Рис. 3. Структура электромеханического усилителя

К системе управления рулевым колесом легкового автомобиля с усилителем, как правило, предъявляются следующие требования:

- 1) обеспечение комфортного уровня усилия на руле, что соответствует 5...7 Н·м при частоте вращения до 1 с^{-1} ;
- 2) минимально возможный уровень колебаний на управляемых колесах, связанных с переходными процессами в ЭМУР;
- 3) ослабление высокочастотных воздействий дорожного покрытия (ударов) на руль;
- 4) сохранение эффекта естественного "самовозврата" управляемых колес автомобиля в нейтральное положение при выходе из поворота;
- 5) обеспечение "информированности" водителя в процессе управления автомобилем на высоких скоростях.

В данной работе будем рассматривать только парковочный режим работы автомобиля, для которого необходимо обеспечить выполнение первых двух требований. Задача стабилизации автомобиля на больших скоростях движения не рассматривается. Таким образом, от системы управления требуется обеспечить комфортный для человека уровень быстродействия и свести к минимуму усилия и колебательность переходных процессов на рулевом валу.

Переходя к формальным требованиям, можно сказать, что в замкнутой системе необходимо обеспечить следующие показатели качества переходного процесса: минимальное время переходного процесса t_n и минимальное значение перерегулирования σ , определяемые выражениями:

$$\left. \begin{aligned} t_n < 0,1 \text{ с} \\ \sigma \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Отметим, что представленная постановка является типичной для задачи проектирования систем автоматического управления.

Систему рулевого управления со встроенным электромеханическим усилителем можно рассматривать как классическую двухмассовую систему (рис. 4).

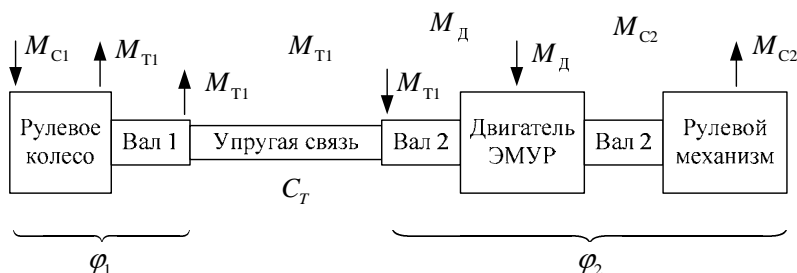


Рис. 4. Структурная схема рулевого управления с ЭМУР

В результате проведенных исследований с применением метода разделения движений исходная математическая модель получена в работе [2] и представлена в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_p - M_{T1} - M_{T2} - M_{C1}; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 &= M_{д} + M_{T1} + M_{T2} - M_{C2}; \\ M_{T1} &= C_{T1} (\varphi_1 - \varphi_2); \\ M_{T2} &= C_{T2} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2); \\ M_{C1} &= f_1(t, \varphi_1, \dot{\varphi}_1); \\ M_{C2} &= f_2(t, \varphi_2, \dot{\varphi}_2), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где J_1 – момент инерции рулевого колеса; J_2 – приведенный момент инерции рулевого механизма; φ_1 – угловое положение рулевого колеса; φ_2 – угловое положение исполнительного двигателя; M_p – момент на рулевом колесе (воздействие водителя); $M_{д}$ – момент исполнительного двигателя; M_{T1} – измеряемая составляющая момента торсиона; M_{T2} – момент внутреннего трения в торсионе; M_{C1} – суммарный момент сопротивления вращению рулевого колеса; M_{C2} – суммарный момент сопротивления рулевого механизма, включающий в себя также воздействие дорожного покрытия; C_{T1} – жесткость торсиона; C_{T2} – коэффициент внутреннего трения торсиона.

Модели (2) соответствует структурная схема, представленная на рис. 5. Данная схема показывает, что система управления рулём с ЭМУР как объект управления содержит 4 интегрирующих звена, 4 входных воздействия (задающие и управляющие) и одно выходное.

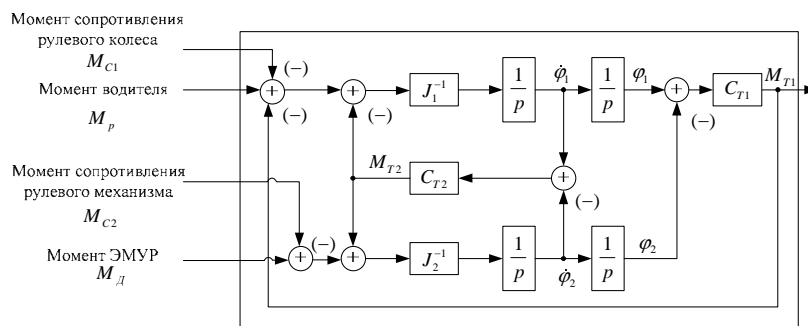


Рис. 5. Структурная схема объекта управления

Представим модель (2) в виде уравнений в переменных состояния. Для этого выполним некоторые преобразования исходной системы и произведем необходимые замены. Прежде всего, подставим выражения для M_{T1} , M_{T2} , M_{C1} , M_{C2} из системы (2) в первое и второе уравнения системы (2). В результате получим

$$\ddot{\phi}_1 = \frac{1}{J_1} (M_p - C_{T1}(\phi_1 - \phi_2) - C_{T2}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) - M_{C1}); \tag{3}$$

$$\ddot{\phi}_2 = \frac{1}{J_2} (M_d + C_{T1}(\phi_1 - \phi_2) + C_{T2}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) - M_{C2}). \tag{4}$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \phi_1, \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\phi}_1;$$

$$x_3 = \phi_2, \quad x_4 = \dot{x}_3 = \dot{\phi}_2;$$

$$y_1 = M_{T1}, \quad y_2 = M_{T2}.$$

Здесь x_1, x_2, x_3, x_4 – переменные состояния. M_p и M_d будем считать управлениями, т.е.

$$M_p = u_1, \quad M_d = u_2.$$

Подставляя принятые обозначения в (3) и (4), придём к выражениям:

$$\dot{x}_2 = \ddot{\phi}_1 = \frac{1}{J_1} u_1 - \frac{C_{T1}}{J_1} (x_1 - x_3) - \frac{C_{T2}}{J_1} (x_2 - x_4) - \frac{1}{J_1} M_{C1}, \tag{5}$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{\phi}_2 = \frac{1}{J_2} u_2 + \frac{C_{T1}}{J_2} (x_1 - x_3) + \frac{C_{T2}}{J_2} (x_2 - x_4) - \frac{1}{J_2} M_{C2}. \tag{6}$$

В векторно-матричной форме система уравнений (5) – (6) в переменных состояния примет вид:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{C_{T1}}{J_1} & -\frac{C_{T2}}{J_1} & -\frac{C_{T1}}{J_1} & \frac{C_{T2}}{J_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{C_{T1}}{J_2} & \frac{C_{T2}}{J_2} & -\frac{C_{T1}}{J_2} & -\frac{C_{T2}}{J_2} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

$$y = \begin{bmatrix} C_{T1} & 0 & -C_{T1} & 0 \\ 0 & C_{T2} & 0 & -C_{T2} \end{bmatrix} x. \quad (7)$$

Далее перейдем к анализу управляемости и наблюдаемости полученной модели. Так как уравнения объекта заданы в символьной форме, то оценить их указанные свойства можно только пользуясь символьными вычислениями. Для этой цели воспользуемся программным приложением MathCad. В силу громоздкости матрицы управляемости и наблюдаемости в явном виде для данного объекта не приводится, но в соответствии с известными критериями модель (2) является управляемой, но не наблюдаемой, т.е. она содержит ненаблюдаемую часть, которая при определенных условиях несущественно влияет на свойства объекта управления. Поэтому его описание можно упростить и представить в виде дифференциального уравнения «вход-выход». Для этого найдем передаточную функцию

$$W_{22}(p) = \frac{y_2(p)}{u_2(p)} \Big|_0 = \frac{B_{22}(p)}{A(p)}. \quad (8)$$

Для определения полиномов передаточной функции воспользуемся программным приложением MathCad. Для наглядности приведем фрагмент листинга программы:

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -C_{T1} & -C_{T2} & C_{T1} & C_{T2} \\ \frac{1}{J_1} & \frac{1}{J_1} & \frac{1}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{C_{T1}}{J_2} & \frac{C_{T2}}{J_2} & \frac{-C_{T1}}{J_2} & \frac{-C_{T2}}{J_2} \end{pmatrix} \quad E := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad B1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad B2 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_2} \end{pmatrix}$$

$$C1 := (C_{T1} \ 0 \ -C_{T1} \ 0)$$

$$C2 := (0 \ C_{T2} \ 0 \ -C_{T2})$$

$$\det(p \cdot E - A) \rightarrow p^2 \cdot \frac{p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + p \cdot J_1 \cdot C_{T2} + J_1 \cdot C_{T1} + C_{T2} \cdot p \cdot J_2 + C_{T1} \cdot J_2}{J_1 \cdot J_2}$$

$$W_{ij} = C_i (pE - A)^{-1} b_j$$

$$C2 \cdot (pE - A)^{-1} \cdot B2 \rightarrow \frac{C_{T2}}{p} \cdot \frac{C_{T1} + p \cdot C_{T2}}{p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + p \cdot J_1 \cdot C_{T2} + J_1 \cdot C_{T1} + C_{T2} \cdot p \cdot J_2 + C_{T1} \cdot J_2} \cdot J_2 - \frac{C_{T2}}{p} \cdot \frac{p^2 \cdot J_1 + p \cdot C_{T2} + C_{T1}}{p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + p \cdot J_1 \cdot C_{T2} + J_1 \cdot C_{T1} + C_{T2} \cdot p \cdot J_2 + C_{T1} \cdot J_2} \cdot J_2$$

Упрощение последнего выражения с использованием команды simplify дает:

$$W_{22} := -C_{T2} \cdot p \cdot \frac{J_1}{(p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + p \cdot J_1 \cdot C_{T2} + J_1 \cdot C_{T1} + C_{T2} \cdot p \cdot J_2 + C_{T1} \cdot J_2)}$$

Таким образом, дифференциальное уравнение «вход-выход», описывающее объект, имеет вид

$$\ddot{e}(t) + C_{T2} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) \dot{e}(t) + C_{T1} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) e(t) = -\frac{C_{T1}}{J_2} u(t), \quad (9)$$

где $e = \varphi_1 - \varphi_2$ – рассогласование; $u = M_d$ – управляющее воздействие, формируемое исполнительным двигателем.

Приведем числовые значения параметров модели, взятые из работы [1]:

$$J_1 = 1,0499989, \quad J_2 = 21,0013,$$

$$C_{T1} = 5013,01031, \quad C_{T2} = 9,1870181.$$

Графики изменения переменных объекта (9) при указанных значениях его параметров, полученные путем моделирования в среде MATLAB, показаны на рис. 6.

Согласно [3] результаты натурных экспериментов и численного моделирования (рис. 6) показывают достаточно большой уровень колебательности объекта управления, описываемого моделью (9).

Вывод: объект управления обладает очень высоким уровнем колебательности, большим значением перерегулирования и длительностью переходного процесса, превышающей требуемую. Следовательно, необходимо осуществить коррекцию системы управления рулём автомобиля с ЭМУР.

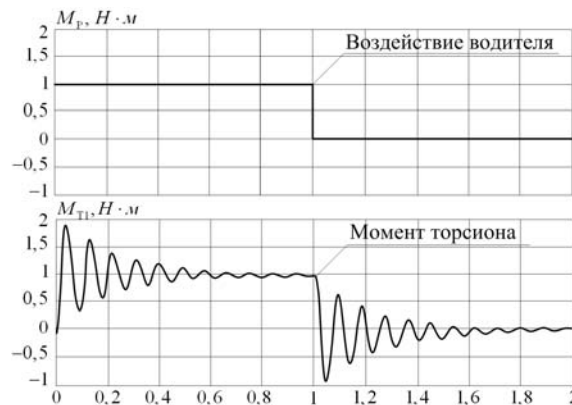


Рис. 6. Реакция объекта управления на воздействие водителя

Проведем расчет двумерного устройства управления (ДУУ) с относительной степенью $\mu_y = 0$, при котором система управления объектом (9) обладает астатизмом порядка $v_g^* = 1$.

Запишем уравнение двигателя:

$$(p^2 + \alpha_1 p + \alpha_0) \cdot e_0 = k u(p). \quad (10)$$

Рассчитаем коэффициенты уравнения (10):

$$\alpha_1 = C_{T2} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) = 9,187, \quad \alpha_0 = C_{T1} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) = 5013, \quad k = -\frac{C_{T1}}{J_2} = -238,7.$$

Запишем полиномы $A(p)$ и $B(p)$:

$$A(p) = p^2 + \alpha_1 p + \alpha_0 = p^{v_0} A_0(p) \Rightarrow A_0 = A, v_0 = 0; B(p) = 1, m = 0, \beta_0^{-1} = k.$$

Запишем полином $\tilde{D}(p)$:

$$\tilde{D}(p) = A(p) \cdot p \cdot \tilde{R}(p) + \beta_m \cdot \tilde{L}(p),$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{R}(p) &= \rho_0 + \rho_1 p, \quad \tilde{L}(p) = \lambda_0 + \lambda_1 p + \lambda_2 p^2, \quad R(p) = p\tilde{R}(p) = \rho_0 p + \rho_1 p^2, \\ L(p) &= \tilde{L}(p). \quad \tilde{D}(p) = \delta_0 + \delta_1 p + \delta_2 p^2 + \delta_3 p^3 + \delta_4 p^4. \end{aligned}$$

Зададимся параметром $t_p^* = 0,25$. Из справочной таблицы [3] выберем соответствующие нашим требованиям коэффициенты передаточной функции: $t_{pm} = 4,81, \Delta_0 = 1, \Delta_1 = 2,8, \Delta_2 = 3,5, \Delta_3 = 2,2, \Delta_4 = 1$. Рассчитаем значения коэффициентов δ :

$$\delta_0 = 137031,4555, \delta_1 = 19942,2077, \delta_2 = 1295,6216, \delta_3 = 42,328, \delta_4 = 1.$$

Для определения коэффициентов уравнения ДУУ запишем систему вида:

$$\begin{bmatrix} -238,7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -238,7 & 0 & 5013 & 0 \\ 0 & 0 & -238,7 & 9,187 & 5013 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 9,187 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \rho_0 \\ \rho_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 137071,46 \\ 19942,21 \\ 1295,62 \\ 42,33 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы даёт значения коэффициентов λ_i и ρ_i , что позволяет записать уравнение «вход-выход» искомого ДУУ в виде

$$R(p)u(p) = Q(p)\varepsilon - (L(p) - Q(p))y(p),$$

или с учетом численных значений

$$(p^2 + 33,141)u = -574,074\varepsilon - (16,849p^2 + 612,458p)y.$$

Уравнения в переменных состояния полученного ДУУ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -33,141 \end{bmatrix} z - \begin{bmatrix} 574,074 & 0 \\ 0 & 54,065 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ y \end{bmatrix}, \\ u &= [0 \quad 1]z + [0 \quad -16,849] \begin{bmatrix} \varepsilon \\ y \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{11}$$

Моделирование системы (10), (11) проводилось с помощью модуля Simulink пакета MATLAB, при ступенчатом и линейном воздействиях.

Схема набора системы при ступенчатом воздействии $g_1(t) = 1(t)$ показана на рис. 7, а график переходного процесса – на рис. 8.

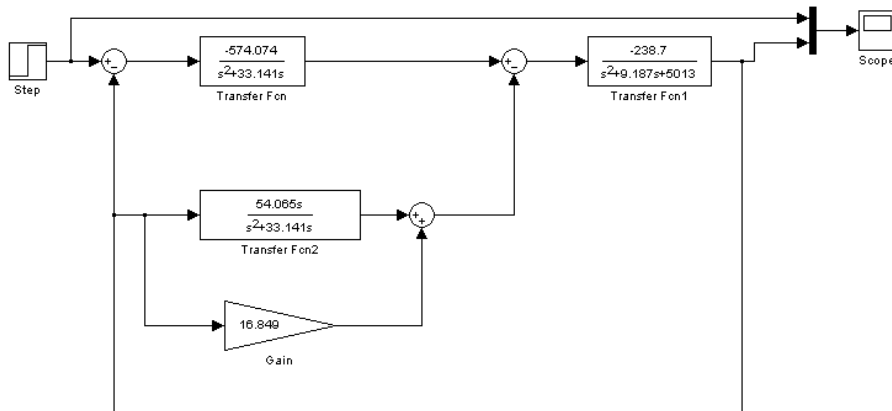


Рис. 7. Схема набора при $g_1(t) = 1(t)$

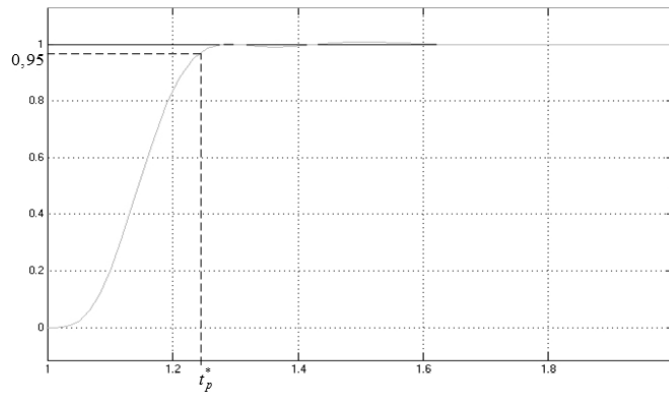


Рис. 8. График переходного процесса при $g_1(t) = 1(t)$

Схема набора системы при линейном воздействии $g_2(t) = t \cdot 1(t)$ показана на рис. 9, а график переходного процесса – на рис. 10.

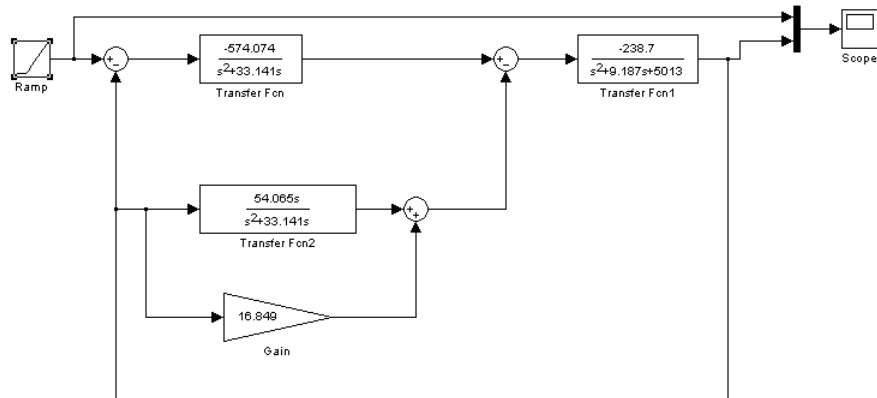


Рис. 9. Схема набора при $g_2(t) = t \cdot 1(t)$

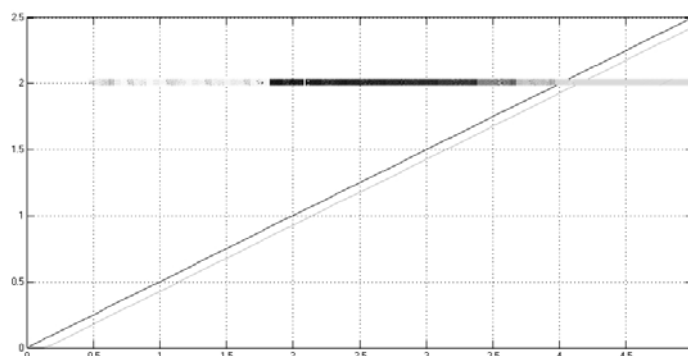


Рис. 10. График переходного процесса при $g_2(t) = t \cdot 1(t)$

Как видно из графиков, полученных в результате моделирования, синтезированная система имеет заданное время регулирования, практически не имеет перерегулирования, а согласно рис. 10 её ошибка при линейном воздействии – постоянная, следовательно порядок астатизма системы равен единице. Таким образом, спроектированная система управления электромеханическим приводом рулевого механизма автомобиля удовлетворяет требуемым показателям качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никулин Г.Л., Французова Г.А. Система управления для электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 10. – С. 21-26.
2. Никулин Г.Л., Французова Г.А. Разработка системы управления электромеханическим усилителем руля // Матер. VII междунар. конф. АПЭП-2004. – 2004. – Т.6. – С. 156-160.
3. Гайдук А.Р. Система автоматического управления. Примеры, анализ, синтез. // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 415 с.

Монченко Марина Игоревна

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: marina.igorevna@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371689.

Monchenko Marina Igorevna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: marina.igorevna@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371689.