

Министерство образования Российской Федерации
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**
Кафедра: "Инжиниринг силовых установок и транспортны
систем"

Курсовой проект

Расчёт электроусилителя руля Tesla Model S



Группа: 3352301/50101

Студент: Пуказов Я. Г.

Преподаватель: *Ролле В.Е.*

Санкт-Петербург
2019

Введение

Пример расчета электроусилителя руля осуществляется для полноприводного легкового автомобиля **Tesla Model S**

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Автомобиль: **Tesla Model S**

Т.к. мы производим расчет ходовой части электромобиля, будем считать определение нагрузок между осями равными, т.е. 50% на переднюю ось и 50% на заднюю ось

$k := 50\% = 0.5$ - коэффициент распределения массы на ось электромобиля в снаряжённом состоянии

$$g := 9.81 \text{ м/с}^2$$

Максимальная допустимая масса: $M_g := 2500$ кг

- в том числе на переднюю ось $M_{ga} := M_g \cdot k = 1.25 \cdot 10^3$ кг;

- на заднюю ось $M_{gb} := M_g \cdot (1 - k) = 1.25 \cdot 10^3$ кг.

Максимальная скорость: $V_{max} := 230$ км/ч

Длина автомобиля: $L := 4970$ мм

Высота автомобиля: $S := 1964$ мм

Ширина автомобиля: $H := 1435$ мм

Колесная база: $L_k := 2960$ мм

Колея автомобиля (передняя): $B_a := 1661$ мм

Колея автомобиля (задняя): $B_b := 1700$ мм

Межшкворневое расстояние: $M := 1533$ мм

Минимальный радиус поворота $R_{min} := 5.7$ м ;

Колеса с шинами **245/45/R19**. Радиус колеса $r_k := 327$ мм. Масса колеса $m_k := 30$ кг

Давление в шинах передней оси $p_e := 0.2$ МПа

Диаметр рулевого колеса $D_{pk} := 380$ мм (ОН 025 254).

Допустимое усилие на рулевом колесе при наличии усилителя $P_{pk.max} := 120$ Н.

Максимальный угол поворота рулевого колеса в одну сторону $\alpha_{max} := 540^\circ$

$$(a_{max} := \frac{\alpha_{max}}{360^\circ} = 1.5 \text{ об})$$

Максимальная скорость поворота рулевого колеса $\omega_{max} := 1.5$ об/с

$$(w_{max} := \omega_{max} \cdot 60 = 90 \text{ об/мин или } w_{max.pi} := \omega_{max} \cdot 2 \cdot \pi = 9.425 \text{ рад/с})$$

Минимальное время поворота рулевого колеса и управляемых колес

$$t_{\min} := \frac{a_{\max}}{\omega_{\max}} = 1 \text{ с.}$$

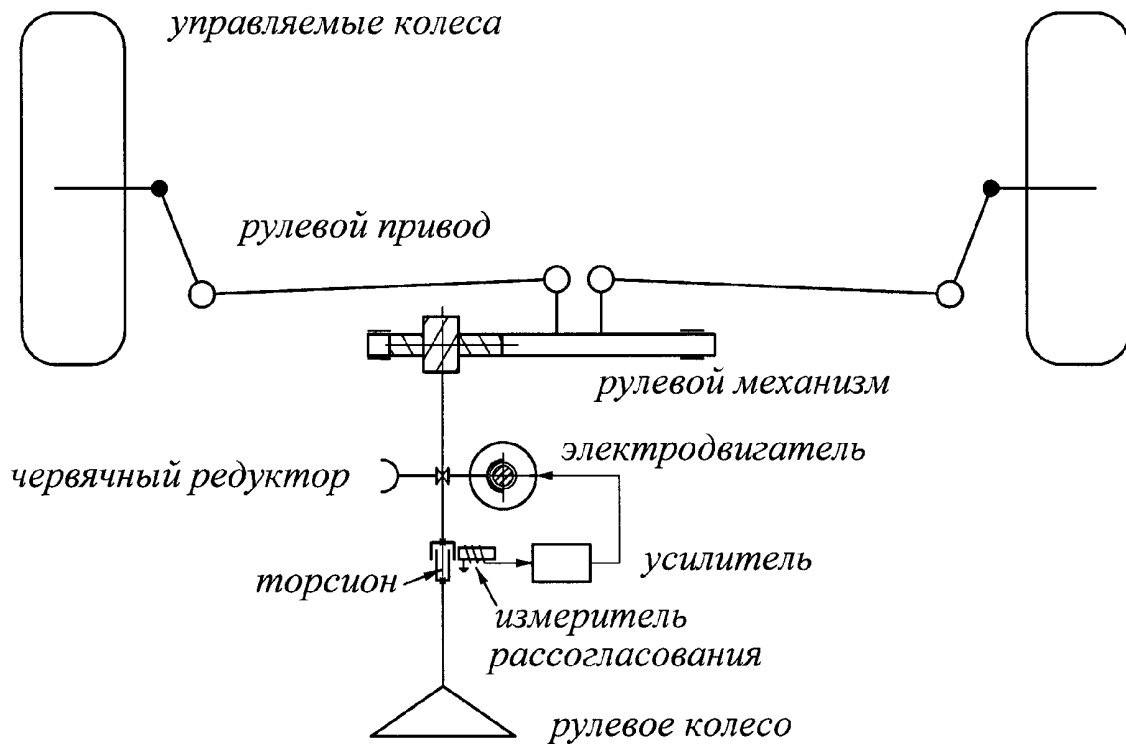


Рис. 1. Принципиальная схема электрического рулевого управления.

1. Энергетический расчет

Передаточное отношение рулевого управления

$b := 0.5 \cdot (B_a \cdot 10^{-3} - M \cdot 10^{-3}) = 0.064$ м - расстояние от вертикальной оси колеса до оси шкворня

$$\Theta_{н.мах} := \arcsin \left(\frac{L \cdot 10^{-3}}{R_{\min} - b} \right) = 1.08$$

$$\Theta_{н.мах} := \Theta_{н.мах} \cdot \frac{180}{\pi} = 61.864 \text{ - максимальный угол поворота наружного колеса}$$

$$\operatorname{ctg} \Theta_{вн.мах} := \cot(\Theta_{н.мах}^\circ) - \frac{M \cdot 10^{-3}}{L \cdot 10^{-3}} = 0.226$$

$$\Theta_{вн.мах} := \operatorname{acot}(\operatorname{ctg} \Theta_{вн.мах}) = 1.348$$

$$\Theta_{вн.мах} := \Theta_{вн.мах} \cdot \frac{180}{\pi} = 77.248 \text{ - максимальный угол поворота внутреннего колеса}$$

Среднее значение углов поворота управляемых колес

$$\Theta_{cp} := \frac{\Theta_{н.мах} + \Theta_{вн.мах}}{2} = 69.556 \quad \text{или} \quad \Theta_{cp.pi} := \Theta_{cp} \cdot \frac{\pi}{180} = 1.214 \text{ рад}$$

$$U_{p.y} := \frac{2 \cdot \alpha_{мах} \cdot \frac{180}{\pi}}{\Theta_{н.мах} + \Theta_{вн.мах}} = 7.764 \text{ - передаточное отношение рулевого управления}$$

$$\Theta' := \frac{\Theta_{cp.pi}}{t_{мин}} = 1.214 \text{ рад/с - угловая скорость поворота управляемых колес}$$

$$\Theta'' := \frac{\Theta'}{t_{мин}} = 1.214 \text{ рад/с}^2 \text{ - угловое ускорение при повороте управляемых колес}$$

Силовой расчет

$$J_k := 2 \cdot m_k \cdot b^2 = 0.246 \text{ кг/м}^2 \text{ - момент инерции управляемых колес}$$

Выбор двигателя

$$\varphi_0 := 0.9 \text{ - коэффициент сцепления колеса с дорогой при его повороте на неподвижном автомобиле}$$

$$T_c := \frac{2}{3} \cdot \varphi_0 \cdot \sqrt{\frac{(0.5 M_{ga} \cdot g)^3}{p_e \cdot 10^6}} = 644.11 \text{ Н*м - момент сопротивления повороту управляемых колес}$$

$$\eta_p := 0.7 \text{ - КПД червячного редуктора}$$

$$\eta_{pn} := 0.9 \text{ - КПД рулевого привода}$$

$$\eta := \eta_p \cdot \eta_{pn} = 0.63 \text{ - КПД привода}$$

$$W := \frac{2 \cdot (T_c + J_k \cdot \Theta'') \cdot \Theta'}{975 \cdot \eta} = 2.547 \text{ кВт - требуемая мощность привода (двигателя)}$$

$$Z_k := 55 \text{ - принятое число зубьев колеса}$$

$$Z_q := 3 \text{ - принятое число зубьев червяка}$$

$$i_p := \frac{Z_k}{Z_q} = 18.333 \text{ - передаточное число редуктора}$$

Необходимо заказать двигатель мощность $W \cdot 1000 = 2.547 \cdot 10^3$ Вт со следующими характеристиками:

$U := 12$ В - напряжение питания

$$I_{\text{я}} := \frac{W \cdot 1000}{U} = 212.265 \quad \text{А - ток якоря}$$

$$\omega_{\partial, \text{pi}} := \Theta' \cdot i_p \cdot U_{p, y} = 172.788 \quad \text{рад/с - обороты двигателя}$$

$$\omega_{\partial} := \frac{\omega_{\partial, \text{pi}}}{2 \cdot \pi} \cdot 60 = 1.65 \cdot 10^3 \quad \text{об/мин - обороты двигателя}$$

$$M_{\text{н}} := \frac{W \cdot 1000}{\omega_{\partial, \text{pi}}} = 14.742 \quad \text{Н*м - номинальный момент}$$

$$i := \frac{\omega_{\partial, \text{pi}}}{\Theta'} = 142.331 \quad \text{- общее передаточное отношение привода от двигателя к управляемым колесам}$$

$$J_{\partial} := \frac{T_c + J_{\kappa} \cdot \Theta''}{i^2 \cdot \Theta''} = 0.026 \quad \text{кг*м}^2 \text{ - необходимый момент инерции двигателя}$$

$$i \cdot \Theta' = \omega_{\partial, \text{pi}} = 1 \text{ - проверка по скорости}$$

Проверка на перегрузку:

$$T_{\text{н}} := \frac{W \cdot 1000}{\omega_{\partial, \text{pi}}} = 14.742 \quad \text{Н*м - номинальный момент}$$

$$T_{\text{mp}} := \frac{T_c}{i \cdot \eta} + \left(\frac{J_{\kappa}}{i} + J_{\partial} \cdot i \right) = 10.914 \quad \text{Н*м - требуемый момент}$$

$$\frac{T_{\text{mp}}}{T_{\text{н}}} = 0.74 \text{ - отношение} \quad \frac{T_{\text{mp}}}{T_{\text{н}}} < 2 = 1$$

Коэффициенты передаточной функции двигателя

$$W(p) = \frac{k_{\partial}}{p \cdot (T_{\partial} \cdot p + 1)} \quad \text{- типовая передаточная функция двигателя}$$

Здесь k_{∂} - коэффициент передачи двигателя по скорости; T_{∂} - постоянная времени; p - оператор дифференцирования

$$c_{\text{м}} := \frac{T_{\text{н}}}{I_{\text{я}}} = 0.069 \quad \text{Н*м/А - коэффициент момента}$$

$$C_e := 0.105 \cdot c_m = 0.007 \quad \text{В*с/рад - коэффициент противо-ЭДС}$$

$$R_{\text{я}} := \frac{U - C_e \cdot \omega_{\partial, \text{pi}}}{I_{\text{я}}} = 0.051 \text{ Ом - сопротивление якоря определим}$$

$$J := J_{\partial} + \frac{J_{\kappa}}{i^2} = 0.026 \quad \text{кг*м}^2 \text{ - полный момент инерции нагрузки}$$

$$T_{\partial} := \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot c_m} = 2.619 \text{ с - постоянная времени передаточной функции двигателя}$$

$$T_m := 0.011 \text{ с - постоянная времени}$$

$$k_{\partial} := \frac{1}{C_e} = 137.133 \quad \text{рад/В*с - коэффициент передачи двигателя по скорости}$$

В результате получена следующая передаточная функция двигателя:

$$W(p) := \frac{k_{\partial}}{p \cdot (T_m \cdot p + 1)} \rightarrow \frac{137.1330126566973}{p \cdot (0.011 \cdot p + 1)}$$

Передаточная функция измирителя рассогласования

$$U_{\delta} = k_{\delta} \cdot \Delta\theta \quad \text{- выходное напряжение на выходе измирителя рассогласования}$$

k_{δ} - крутизная характеристики измирителя рассогласования

$$\Delta\theta = \alpha - \theta \cdot \frac{1}{i_{pn}} \quad \text{- рассогласование}$$

$$\text{Передаточная функция измерителя рассогласования: } W_{up}(p) = k_{\delta}$$

$$\text{При допустимом люфте рулевого колеса } \Delta\theta := 3^{\circ} = 0.052 \text{ рад}$$

$$\text{и напряжении на входе в усилитель } U_{\delta} := 12 \text{ В}$$

$$k_{\delta} := \frac{U_{\delta}}{\Delta\theta \cdot 10} = 22.918 \quad \text{В/рад}$$

$$\text{Принимаем значение } k_{\delta} := 40 \text{ В/рад}$$

$$W_p(p) := \frac{1}{i_p} = 0.055 \quad \text{- передаточная функция редуктора} \quad k_p := \frac{1}{i_p} = 0.055$$

$$W_{py}(p) := \frac{1}{U_{p.y}} = 0.129 \text{ - передаточная функция рулевого управления} \quad k_{py} := \frac{1}{U_{p.y}} = 0.129$$

Передаточная функция усилителя

Типовая передаточная функция усилителя имеет вид

$$W(p) = \frac{k_y}{(T_y \cdot p + 1)}$$

Здесь

k_y - коэффициент усиления усилителя

T_y - постоянная времени усилителя

p - оператор дифференцирования

Примем

$\delta_{ск} := 20$ - скоростная ошибка

$\Theta'_0 := 3$ - допускаемая амплитуда колебания управляемых колес

$$\mu := \frac{\Theta'_0 \cdot 60}{\delta_{ск}} = 9 \quad \text{- добротность системы управления при заданной скоростной ошибке}$$

$$k_y := \frac{\mu}{k_\delta \cdot k_\partial \cdot k_p \cdot k_{py}} = 0.234 \quad \text{- необходимый коэффициент усиления усилителя}$$

Принимаем значение постоянной времени усилителя $T_y := 0.01$ с

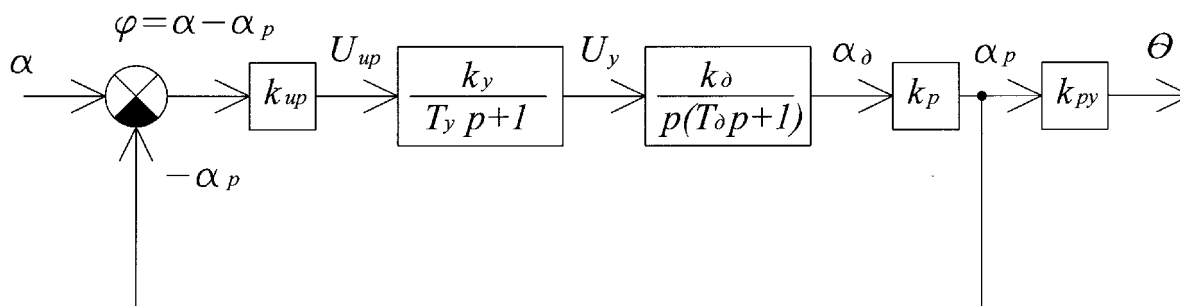


Рис. 2. Структурная схема электроусилителя рулевого управления

Передаточная функция разомкнутой системы управления:

$$W(p) = W_{up}(p) \cdot W_y(p) \cdot W_\partial(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{py}(p)$$

или

$$W(p) := k_\delta \cdot \frac{k_y}{(T_y \cdot p + 1)} \cdot \frac{k_\partial}{p \cdot (T_\partial \cdot p + 1)} \cdot k_p \cdot k_{py} \rightarrow \frac{9.00000000000000013573}{p \cdot (0.01 \cdot p + 1) \cdot (0.011 \cdot p + 1)}$$

$$W_3(p) := \frac{W(p)}{1 + W(p) \cdot \left(\frac{1}{k_{py}}\right)} \xrightarrow{\text{collect}} \frac{9.00000000000000013573 \cdot 10^{19}}{1.1 \cdot 10^{15} \cdot p^3 + 2.1 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 1.0 \cdot 10^{19} \cdot p + 6.9871539531258272445 \cdot 10^{20}}$$

2. Динамический расчет системы управления

Проверка устойчивости системы

Критерий Вышнеградского:

$$2.1 \cdot 10^{17} \cdot 1.0 \cdot 10^{19} > 1.1 \cdot 10^{15} \cdot 6.9871539531258272445 \cdot 10^{20} = 1$$

замкнутая система устойчива

Анализ точности системы

$$\Phi(p) := 1 - W_3(p) \xrightarrow{\text{collect}} \frac{1.1 \cdot 10^{15} \cdot p^3 + 2.1 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 1.0 \cdot 10^{19} \cdot p + 6.0871539531258271088 \cdot 10^{20}}{1.1 \cdot 10^{15} \cdot p^3 + 2.1 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 1.0 \cdot 10^{19} \cdot p + 6.9871539531258272445 \cdot 10^{20}}$$

$$\Phi(p) \xrightarrow{\text{series}} 0.87119218983326263 + 0.001843494662216694275 \cdot p + 0.000012329331184972629688 \cdot p^2$$

$$C_0 := 0.87119218983326263$$

$$C_1 := 0.001843494662216694275 \quad \text{с}$$

$$C_2 := 0.000012329331184972629688 \quad \text{с}^2$$

$$\omega_t := \alpha_{max} \cdot \frac{180}{\pi} = 540$$

$$\omega'_t := 0$$

$$\varepsilon_{pi} := C_0 + C_1 \cdot 57.3 \cdot \omega_t + \frac{C_2}{2} \cdot \omega'_t = 57.913 \quad \text{рад - уравнение ошибки}$$

$$\varepsilon := \varepsilon_{pi}^\circ = 1.011 \quad \text{градусов - ошибка в установившемся режиме поворота при повороте рулевого колеса с постоянной скоростью } \omega_t = 540 \quad \text{градусов/с}$$

Анализ качества исходной системы

Для определения частотных показателей устойчивости и качества исходной системы применяем компьютерные технологии, используя математическую систему Mathcad.

Анализ динамических характеристик САУ с использованием математической среды Mathcad

$k_{\partial} = 137.133$ р/с*В - коэффициент усиления двигателя

$T_M = 0.011$ с - постоянная времени двигателя

$W_{\partial}(p) := \frac{k_{\partial}}{p \cdot (T_M \cdot p + 1)}$ - передаточная функция двигателя

$k_y = 0.234$ - коэффициент усиления усилителя

$T_y = 0.01$ с - постоянная времени усилителя

$W_y(p) := \frac{k_y}{T_y \cdot p + 1}$ - передаточная функция усилителя

$k_{py} = 0.129$ - передаточная функция рулевого управления, $k_{py} = 1/U_{py}$

$k_p = 0.055$ - передаточная функция редуктора, $k_p = 1/U_p$

$k_{\delta} = 40$ В/рад - передаточная функция устройства рассогласования

$W_p(p) := k_{\delta} \cdot W_y(p) \cdot W_{\partial}(p) \cdot k_p \cdot k_{py}$ - передаточная функция разомкнутой системы

$W_3(p) := \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot \left(\frac{1}{k_{py}}\right)}$ - передаточная функция замкнутой системы

$D_p(p) := p \cdot (T_M \cdot p + 1) \cdot (T_y \cdot p + 1)$ - характеристический многочлен разомкнутой системы

$D_{p1}(p) := D_p(p) \xrightarrow{\text{collect}} 0.00011 \cdot p^3 + 0.021 \cdot p^2 + p$

$D_3(p) := p \cdot (T_M \cdot p + 1) \cdot (T_y \cdot p + 1) + \frac{9}{k_{py}}$ - характеристический многочлен замкнутой системы

$D_{31}(p) := D_3(p) \xrightarrow{\text{collect}} 0.00011 \cdot p^3 + 0.021 \cdot p^2 + p + 69.871539531258261907$

Анализ устойчивости системы

1. Устойчивость разомкнутой системы

По критерию Вышнеградского:

Все коэффициенты положительные; произведение средних коэффициентов больше произведения крайних к-тов.

Для уравнения $D_{p1}(p)$ $0.021 \cdot 1 > 0.00011 \cdot 0 = 1$ **Разомкнутая система устойчива.**

2. Устойчивость замкнутой системы

По критерию Гурвица

Все коэффициенты положительные. Должны быть положительны n главных определителей матрицы:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} \quad a_0 := 0.00011 \quad a_1 := 0.021 \quad a_2 := 1 \quad a_3 := 166.7$$

$$M := \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{bmatrix} \quad \|M\| = 0.003$$

Определитель $\|M\| > 0 = 1$.

Замкнута система устойчива

По критерию Михайлова

САУ будет устойчивой, если характеристическая кривая при изменении частоты ω от 0 до ∞ , начиная с положительной действительной оси, обходит последовательно в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки, n квадрантов. n - порядок уравнения

$$\omega := 0 \dots 1000 \quad j := \sqrt{-1} \quad p(\omega) := j \cdot \omega$$

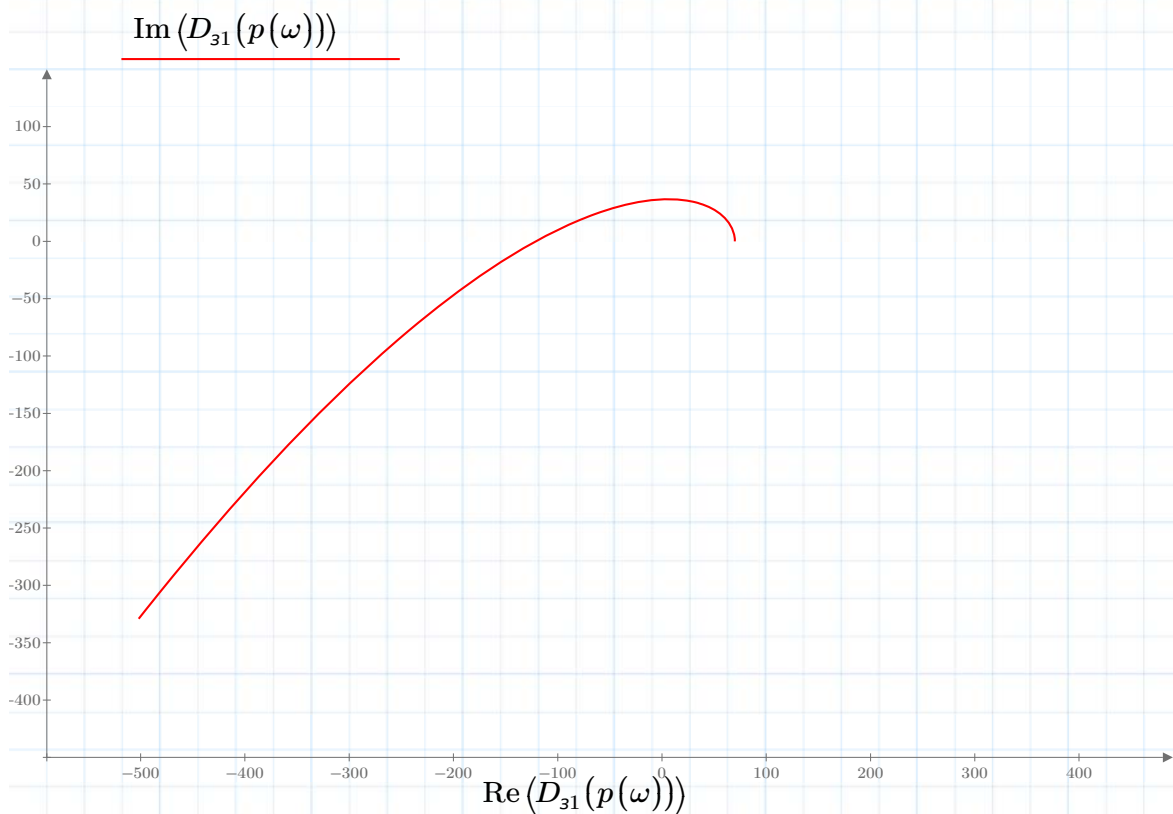


Рисунок 1 - Кривая Михайлова

Для уравнения 3-го порядка характеристическая кривая при изменении частоты от ω до ∞ обходит последовательно против часовой стрелки 3 квадранта.

Замкнутая система устойчива.

По критерию Найквиста

Разомкнутая система устойчива. Замкнутая САУ будет устойчивой, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точки с координатами $(-1; j0)$

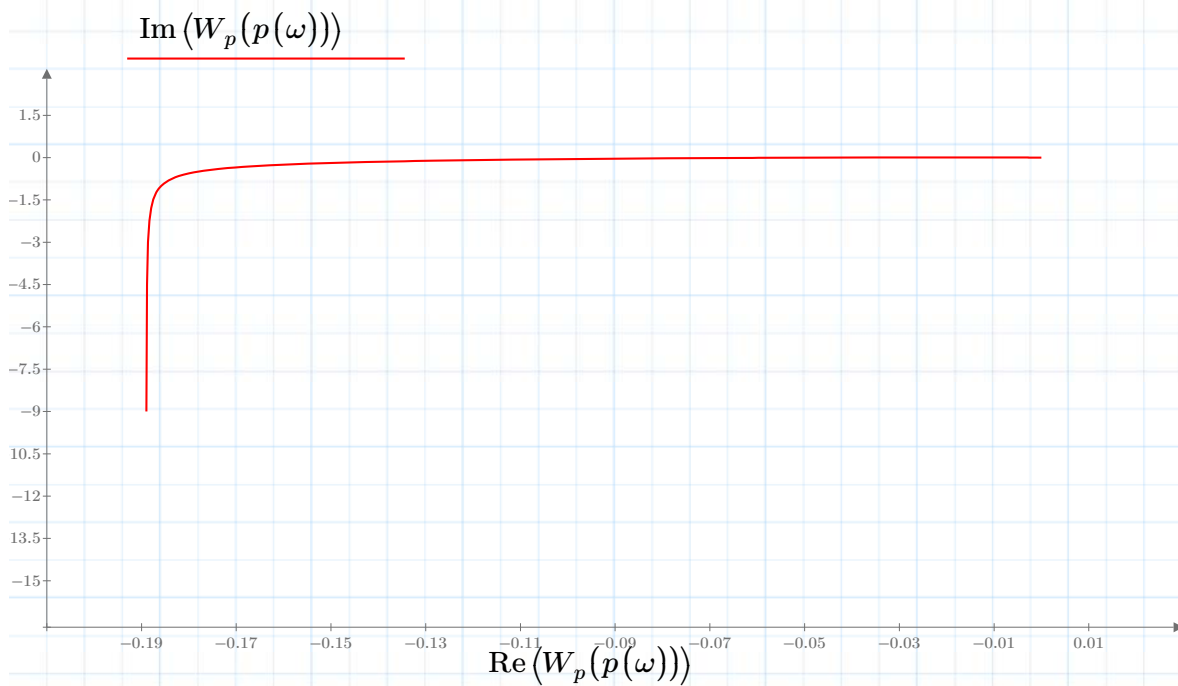


Рисунок 2 - Годограф вектора АФХ разомкнутой системы

АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точки с координатами $(-1; j0)$.

Замкнутая система устойчива

По логарифмическим АФЧХ-ам разомкнутой системы

Замкнута САУ будет устойчива, если ФЧХ разомкнутой системы пересекает ось $-\pi$ при отрицательных значениях АЧХ $\omega := 0.1, 0.2 \dots 1000$

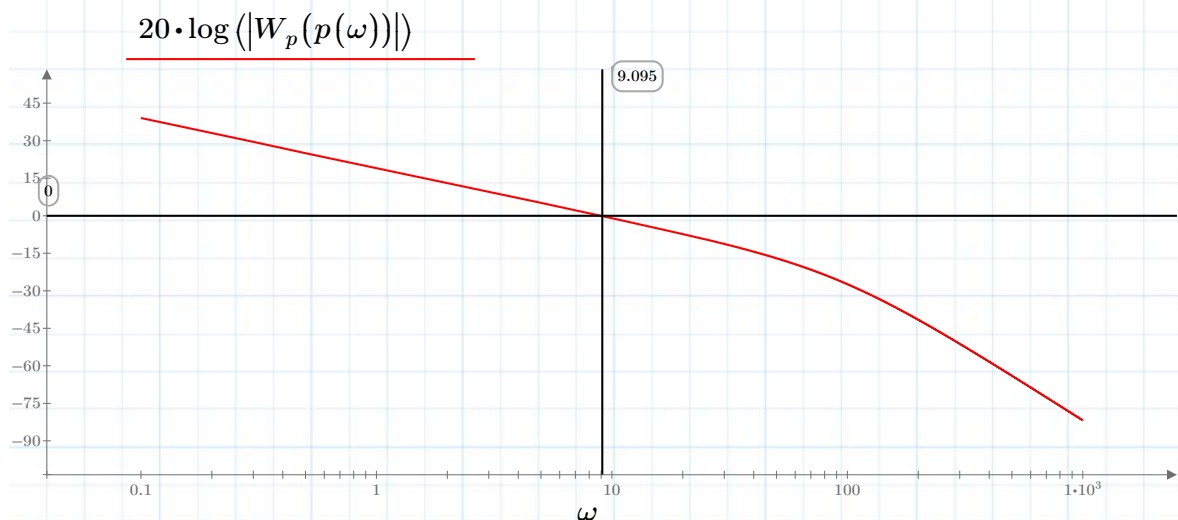


Рисунок 3 - Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы

При помощи трассера измеряем $\omega(L=0)=9.095$ 1/с

Система устойчива.

$$\varphi(\omega) := -90 - \operatorname{atan}(0.01 \cdot \omega) \cdot 57.3 - \operatorname{atan}(0.011 \cdot \omega) \cdot 57.3$$

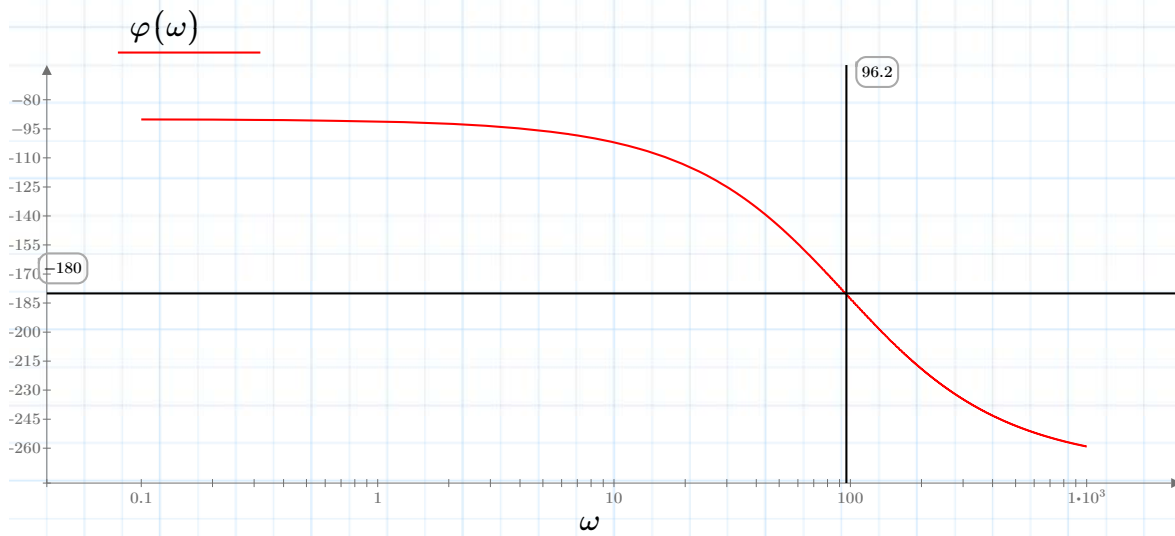


Рисунок 4 - Логарифмическая фазо-частотная характеристика разомкнутой системы
При помощи трассера измеряем $\omega(\varphi=-180)=96.2$ 1/с **Система устойчива.**

Частотные методы анализа качества системы

1. По вещественной характеристике замкнутой системы

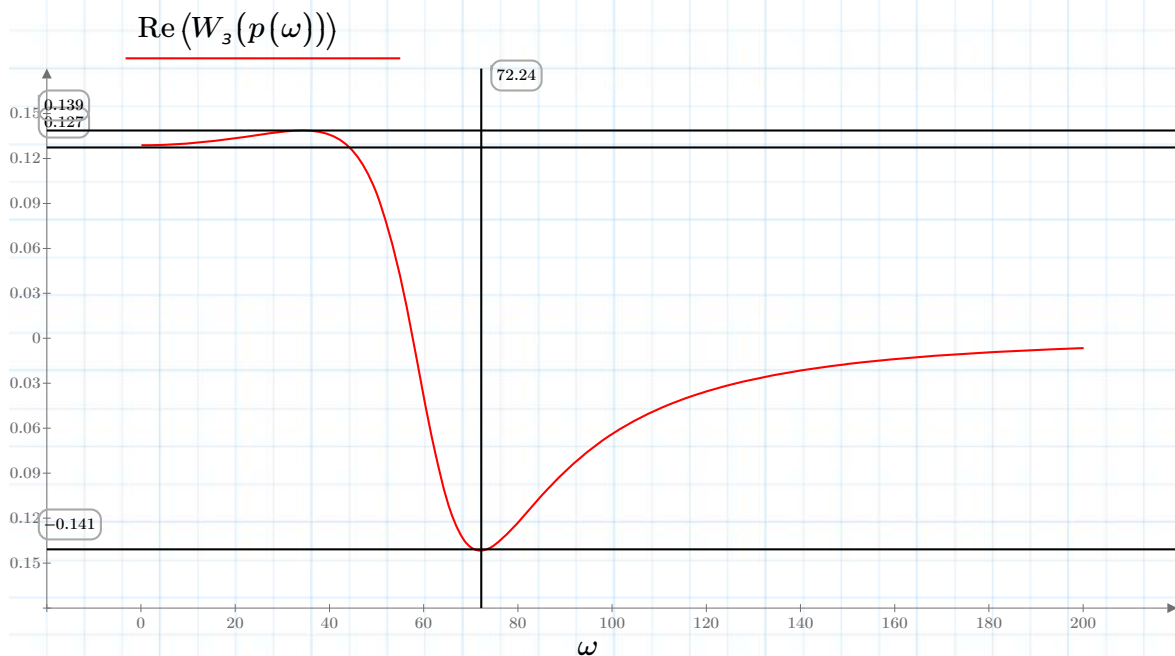


Рисунок 5 - Вещественная частотная характеристика замкнутой системы

При помощи трассера измеряем: $Z_0 := 0.127$ $Z_{max} := 0.139$ $Z_{min} := -0.141$ $\omega_c := 72.24$

Величина перерегулирования $\sigma := (1.18 \cdot Z_{max} - Z_0) \cdot \frac{100}{Z_0} = 29.15\%$

Время переходного процесса $t_{\text{мун}} > \frac{\pi}{\omega_c} = 1$

Показатель колебательности процесса $M := \frac{(Z_{max} - Z_{min})}{Z_0} = 2.205$

2. По переходной характеристике замкнутой системы

$t := 0, 0.01 \dots 5$ - диапазон времени переходного процесса (начало, шаг .. конец)

$h(t) := \frac{2}{\pi} \cdot \left(\int_0^{500} \text{Re}(W_3(p(\omega))) \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega \right)$ переходная характеристика исходной системы

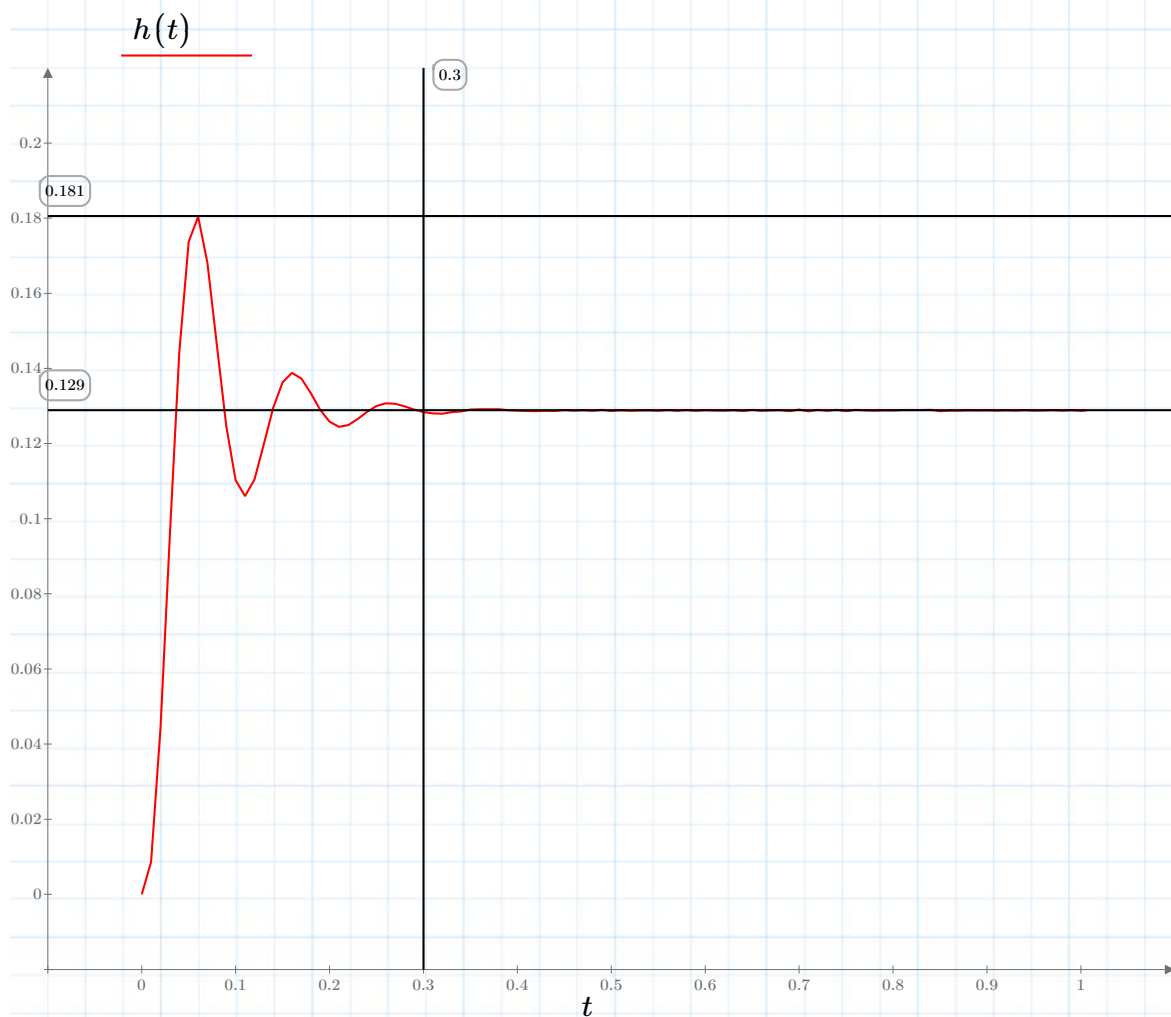


Рисунок 6 - Переходная характеристика исходной системы

Вывод

В целом переходная характеристика системы имеет допустимое перерегулирование, допустимую колебательность и маленькое время регулирования. Корректировка не требуется!

Список литературы

1. Осепчугов В. В., Фрумкин А. К. Автомобиль. Анализ конструкций, элементы расчета. М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.
2. Лукин П. П. и др. Конструирование и расчет автомобиля. Учебник для вузов. М.: Машиностроение 1984, - 376 с.
3. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учеб. пособие для вузов. А.И. Гришкевич и др. Мн.: Выш. шк. 1987. – 200 с.
4. Кравец В. Н.. Проектирование автомобиля. Нижний Новгород: НПИ, 1992. - 230 с.
5. Шасси автомобиля.