

УДК 621.771

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ ОМД ПО КРИТЕРИЮ
МИНИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ****Андрей Анатольевич Мальцев**

к.т.н., доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Для исследования продольных и крутильных колебаний, вызванных ударом заготовки о рабочие валки прокатного стана, на основании уравнений Лагранжа 2 рода была построена и запрограммирована в среде MathCAD динамическая модель, позволяющая оптимизировать конструкцию машины обработки металлов давлением (ОМД) по критерию минимизации коэффициента динамичности.

Ключевые слова: коэффициент динамичности, металлургия, конструкция, оптимизация.**OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF THE OMD MACHINE ACCORDING
TO THE CRITERION OF MINIMIZING THE COEFFICIENT OF DYNAMISM****Andrey A. Maltsev**

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Engineering, BMSTU ФН-7 and МТ-10 dpt.

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

To study the longitudinal and torsional vibrations caused by the impact of the workpiece on the working rolls of the rolling mill, based on the Lagrange equations of the 2nd kind, a dynamic model was built and programmed in the MathCAD environment, which allows optimizing the design of the metal forming machine (OMD) according to the criterion of minimizing the coefficient of dynamism.

Keywords: dynamic coefficient, metallurgy, construction, optimization.**Введение**

Объект исследования – машина ОМД, производящая стальной лист из слябовых заготовок (рис. 1).



Рисунок 1. Многоклетевой прокатный стан 2000 НЛМК

Предмет исследования – прокатка заготовки в одной из рабочих клеток стана 2000 НЛМК (рис. 2).



Рисунок 2. Пластическая деформация металла между рабочими валками

Цель исследования – оптимизация конструкции рабочей клетки (рис. 3) прокатного стана 2000 НЛМК путем научно обоснованной установки демпфирующих устройств, предназначенных для подавления механических колебаний, вызванных ударом при захвате заготовки рабочими валками.

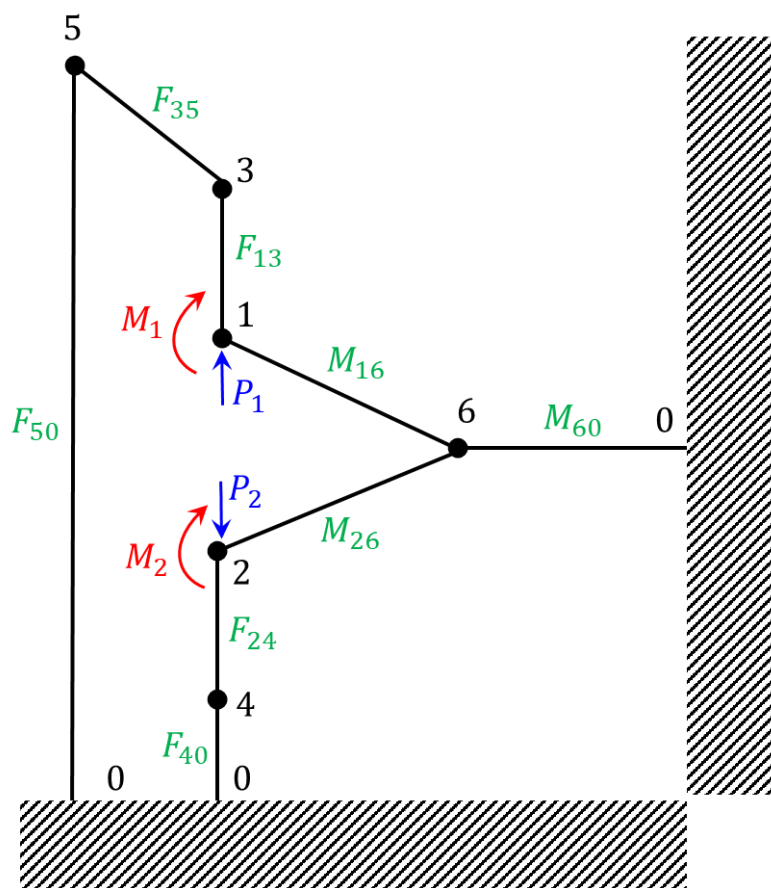


Рисунок 3. Расчетная схема рабочей клетки:
 1, 2, 3, 4, 5 – продольно-колеблющиеся массы;
 1, 2, 6 – крутильно-колеблющиеся массы;
 0 – неподвижная заделка;
 P_1, P_2 – внешние силы прокатки;
 M_1, M_2 – внешние моменты прокатки;
 $F_{13}, F_{24}, F_{35}, F_{40}, F_{50}$ – упругие силы связей;
 M_{60}, M_{16}, M_{26} – моменты сил упругости связей

Исходные данные – взятые из учебного пособия [1] и научной статьи [2] численные значения следующих параметров:

Силы прокатки:

$P_1 = 19 \cdot 10^6$ Н – действующая на верхний рабочий валок;

$P_2 = 19 \cdot 10^6$ Н – действующая на нижний рабочий валок;

Моменты прокатки:

$M_1 = 750 \cdot 10^3$ Н · м – на верхнем рабочем валке;

$M_2 = 750 \cdot 10^3$ Н · м – на нижнем рабочем валке;

Массы:

$m_1 = 24 \cdot 10^3$ кг – комплект верхнего рабочего валка;

$m_2 = 25 \cdot 10^3$ кг – комплект нижнего рабочего валка;

$m_3 = 86 \cdot 10^3$ кг – комплект верхнего опорного валка;

$m_4 = 90 \cdot 10^3$ кг – комплект нижнего опорного валка;

$m_5 = 100 \cdot 10^3$ кг – верхняя часть рабочей клетки;

Осевые моменты инерции:

$J_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – верхний рабочий валок;

$J_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – нижний рабочий валок;

$J_6 = 19 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – оба шестеренных валка;

Крутильные жесткости участков электропривода:

$c_{60} = 472 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ – моторный участок (6 – 0);

$c_{16} = 250 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ – участок верхнего шпинделя (1 – 6);

$c_{26} = 270 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ – участок нижнего шпинделя (2 – 6);

Коэффициенты демпфирования (крутильные колебания):

$\beta_{60} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 6 – 0;

$\beta_{16} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 1 – 6;

$\beta_{26} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 2 – 6;

Линейные жесткости участков рабочей клетки:

$k_{13} = 60 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}$ – между верхними рабочим и опорным валками (1 – 3);

$k_{24} = 60 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}$ – между нижними рабочим и опорным валками (2 – 4);

$k_{35} = 57 \cdot 10^9 \text{ Н} / \text{м}$ – между опорным валком и нажимными винтами (3 – 5);

$k_{40} = 31 \cdot 10^9 \text{ Н} / \text{м}$ – от опорного валка до нижних поперечин (4 – 0);

$k_{50} = 26 \cdot 10^9 \text{ Н} / \text{м}$ – от верхних поперечин до лап (5 – 0);

Коэффициенты демпфирования (продольные колебания):

$\mu_{13} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 1 – 3;

$\mu_{24} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 2 – 4;

$\mu_{35} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 3 – 5;

$\mu_{40} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 4 – 0;

$\mu_{50} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ – участок 5 – 0;

Задача исследования – построение графиков изменения во времени t линейных координат $(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$ и линейных скоростей $(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ продольно-колеблющихся масс, угловых координат $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_6)$ и угловых скоростей $(\omega_1, \omega_2, \omega_6)$ крутильно-колеблющихся масс, упругих сил $(F_{13}, F_{24}, F_{35}, F_{40}, F_{50})$ и моментов сил упругости (M_{60}, M_{16}, M_{26}) связей.

Материалы и методы исследования

Для исследования механических колебаний мною запрограммирована в среде MathCAD следующая математическая модель:

Введены величины продольно-колеблющихся масс [кг] :

$$m_1 := 24 \cdot 10^3$$

$$m_2 := 25 \cdot 10^3$$

$$m_3 := 86 \cdot 10^3$$

$$m_4 := 90 \cdot 10^3$$

$$m_5 := 100 \cdot 10^3$$

Введены моменты инерции крутильно-колеблющихся масс [кг · м²] :

$$J_1 := 1 \cdot 10^3$$

$$J_2 := 1 \cdot 10^3$$

$$J_6 := 19 \cdot 10^3$$

Заданы численные значения крутильных жесткостей [Н · м/рад] :

$$c_{60} := 472 \cdot 10^6$$

$$c_{16} := 250 \cdot 10^6$$

$$c_{26} := 270 \cdot 10^6$$

Заданы величины линейных жесткостей [Н/м] :

$$k_{13} := 60 \cdot 10^6$$

$$k_{24} := 60 \cdot 10^6$$

$$k_{40} := 31 \cdot 10^9$$

$$k_{35} := 57 \cdot 10^9$$

$$k_{50} := 26 \cdot 10^9$$

Введены коэффициенты демпфирования при кручении [Н · м · с/м] :

$$\beta_{60} := 60 \cdot 10^3$$

$$\beta_{16} := 60 \cdot 10^3$$

$$\beta_{26} := 60 \cdot 10^3$$

Введены коэффициенты демпфирования [Н · с/м] :

$$\mu_{13} := 8 \cdot 10^9$$

$$\mu_{24} := 8 \cdot 10^9$$

$$\mu_{40} := 7.5 \cdot 10^9$$

$$\mu_{35} := 7.5 \cdot 10^9$$

$$\mu_{50} := 8 \cdot 10^9$$

Заданы численные значения сил прокатки [Н]:

$$P_1 := 19 \cdot 10^6$$

$$P_2 := 19 \cdot 10^6$$

Заданы численные значения моментов прокатки [Н · м]:

$$M_1 := 750 \cdot 10^3$$

$$M_2 := 750 \cdot 10^3$$

Начало вычислительного блока:

Given

Начальные значения угловых координат [рад]:

$$\varphi_1(0) = 0$$

$$\varphi_2(0) = 0$$

$$\varphi_6(0) = 0$$

Начальные значения угловых скоростей [рад/с]:

$$\omega_1(0) = 0$$

$$\omega_2(0) = 0$$

$$\omega_6(0) = 0$$

Начальные значения линейных координат [м]:

$$y_1(0) = 0$$

$$y_2(0) = 0$$

$$y_3(0) = 0$$

$$y_4(0) = 0$$

$$y_5(0) = 0$$

Начальные значения линейных скоростей [м/с]:

$$v_1(0) = 0$$

$$v_2(0) = 0$$

$$v_3(0) = 0$$

$$v_4(0) = 0$$

$$v_5(0) = 0$$

Начальные значения моментов сил упругости [Н · м]:

$$M_{60}(0) = 0$$

$$M_{16}(0) = 0$$

$$M_{26}(0) = 0$$

Начальные значения сил упругости [Н]:

$$F_{13}(0) = 0$$

$$F_{24}(0) = 0$$

$$F_{35}(0) = 0$$

$$F_{40}(0) = 0$$

$$F_{50}(0) = 0$$

Выражения для моментов сил упругости:

$$M_{60}(t) = c_{60} \cdot \varphi_6(t) + \beta_{60} \cdot \omega_6(t)$$

$$M_{16}(t) = c_{16} \cdot (\varphi_1(t) - \varphi_6(t)) + \beta_{16} \cdot (\omega_1(t) - \omega_6(t))$$

$$M_{26}(t) = c_{26} \cdot (\varphi_2(t) - \varphi_6(t)) + \beta_{26} \cdot (\omega_2(t) - \omega_6(t))$$

Выражения для сил упругости:

$$F_{13}(t) = k_{13} \cdot (y_1(t) - y_3(t)) + \mu_{13} \cdot (v_1(t) - v_3(t))$$

$$F_{24}(t) = k_{24} \cdot (y_2(t) - y_4(t)) + \mu_{24} \cdot (v_2(t) - v_4(t))$$

$$F_{35}(t) = k_{35} \cdot (y_3(t) - y_5(t)) + \mu_{35} \cdot (v_3(t) - v_5(t))$$

$$F_{40}(t) = k_{40} \cdot y_4(t) + \mu_{40} \cdot v_4(t)$$

$$F_{50}(t) = k_{50} \cdot y_5(t) + \mu_{50} \cdot v_5(t)$$

Угловые скорости колеблющихся масс:

$$\varphi_1'(t) = \omega_1(t)$$

$$\varphi_2'(t) = \omega_2(t)$$

$$\varphi_6'(t) = \omega_6(t)$$

Линейные скорости колеблющихся масс:

$$y_1'(t) = v_1(t)$$

$$y_2'(t) = v_2(t)$$

$$y_3'(t) = v_3(t)$$

$$y_4'(t) = v_4(t)$$

$$y_5'(t) = v_5(t)$$

Уравнения крутильно-колебательного движения масс:

$$\omega_{1'}(t) = \frac{M_1 - M_{16}(t)}{J_1}$$

$$\omega_{2'}(t) = \frac{M_2 - M_{26}(t)}{J_2}$$

$$\omega_{6'}(t) = \frac{M_{16}(t) + M_{26}(t) - M_{60}(t)}{J_6}$$

Уравнения продольно-колебательного движения масс:

$$v_{1'}(t) = \frac{P_1 - F_{13}(t)}{m_1}$$

$$v_{2'}(t) = \frac{P_2 - F_{24}(t)}{m_2}$$

$$v_{3'}(t) = \frac{F_{13}(t) - F_{35}(t)}{m_3}$$

$$v_{4'}(t) = \frac{F_{24}(t) - F_{40}(t)}{m_4}$$

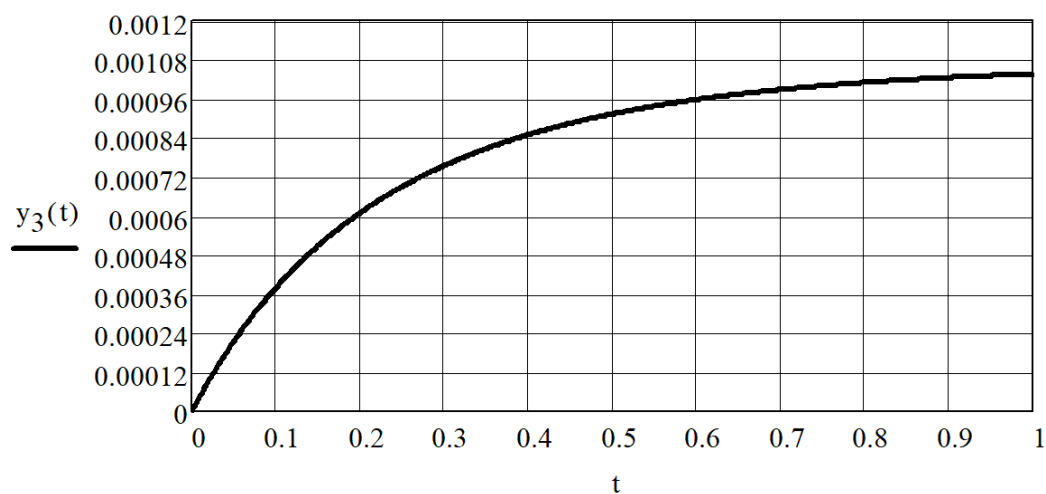
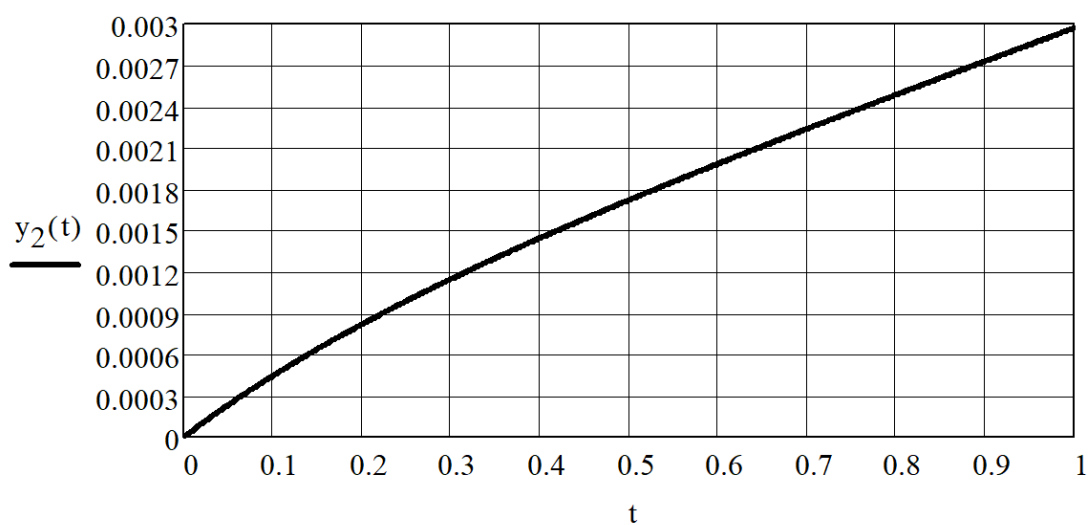
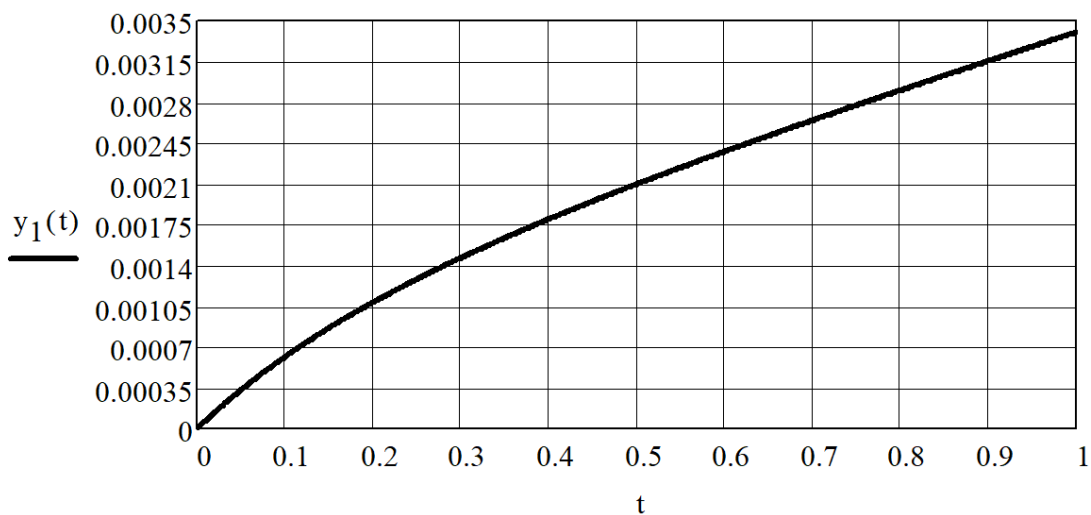
$$v_{5'}(t) = \frac{F_{35}(t) - F_{50}(t)}{m_5}$$

Для решения дифференциальных уравнений колебательного движения масс использован метод Рунге-Кутты:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_6 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_6 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ M_{60} \\ M_{16} \\ M_{26} \\ F_{13} \\ F_{24} \\ F_{35} \\ F_{40} \\ F_{50} \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_6 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_6 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ M_{60} \\ M_{16} \\ M_{26} \\ F_{13} \\ F_{24} \\ F_{35} \\ F_{40} \\ F_{50} \end{pmatrix}, t, 1 \right]$$

Полученные результаты

На временном интервале $t \in [0 \ 1]$ построены графики изменения во времени искомых параметров математической модели (рис. 4 - 9).



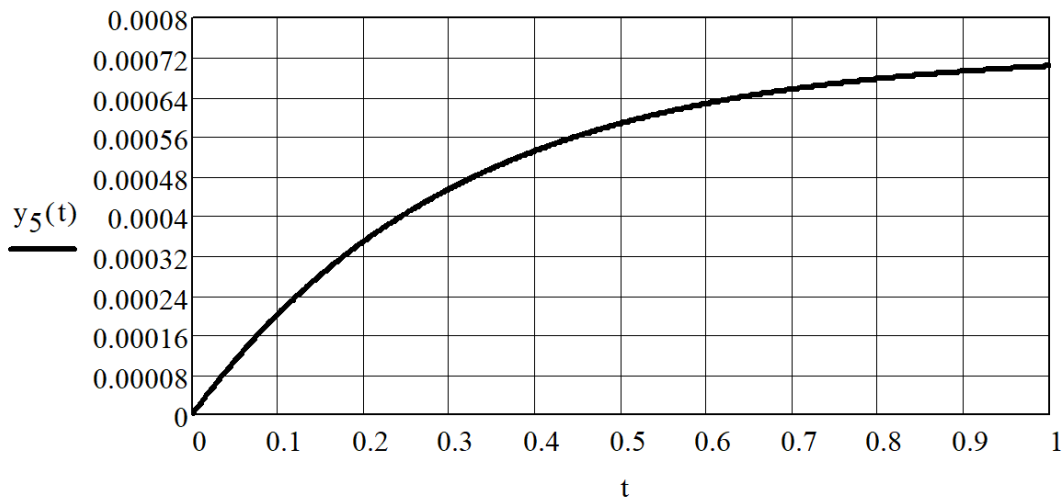
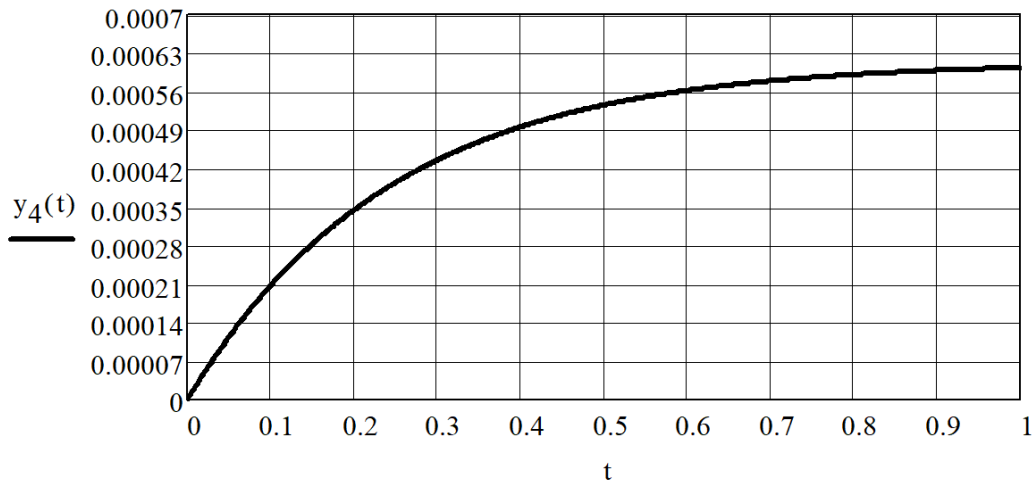
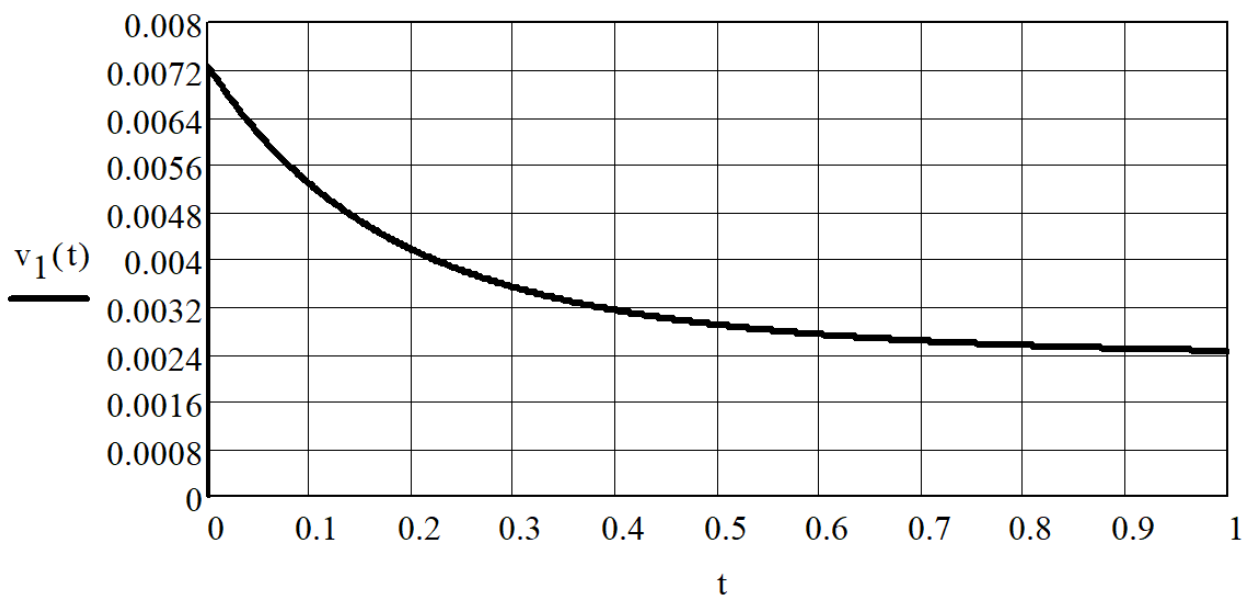
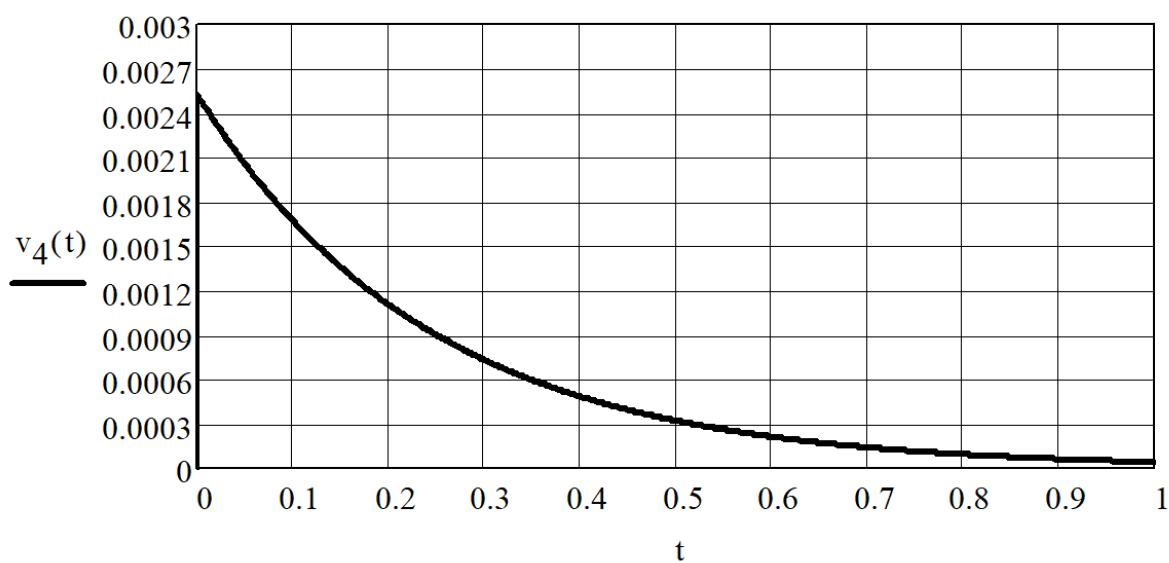
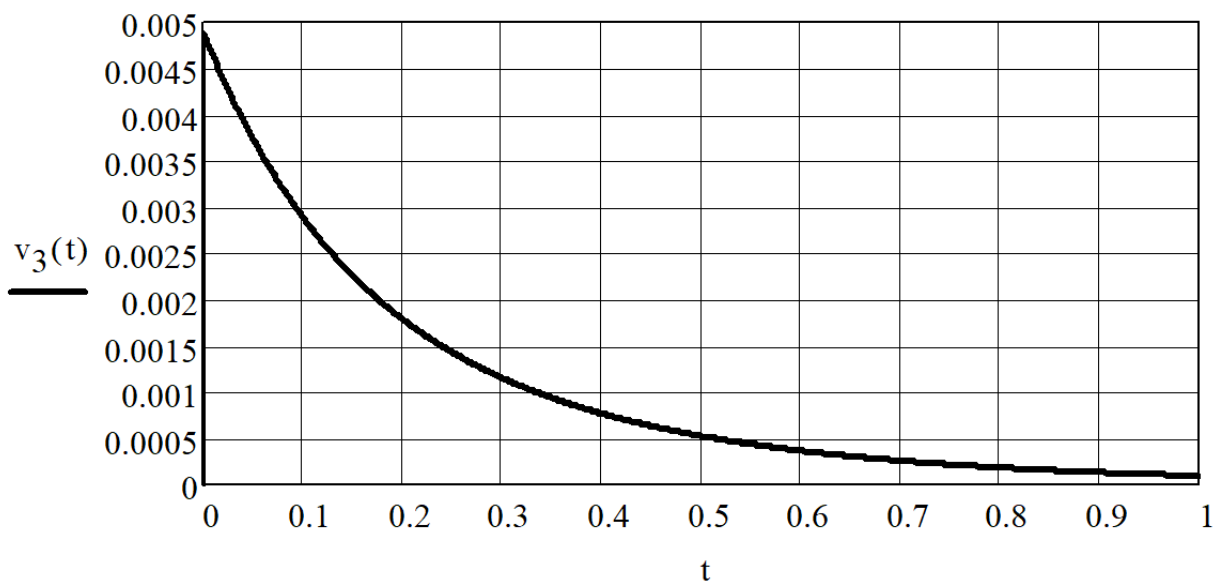
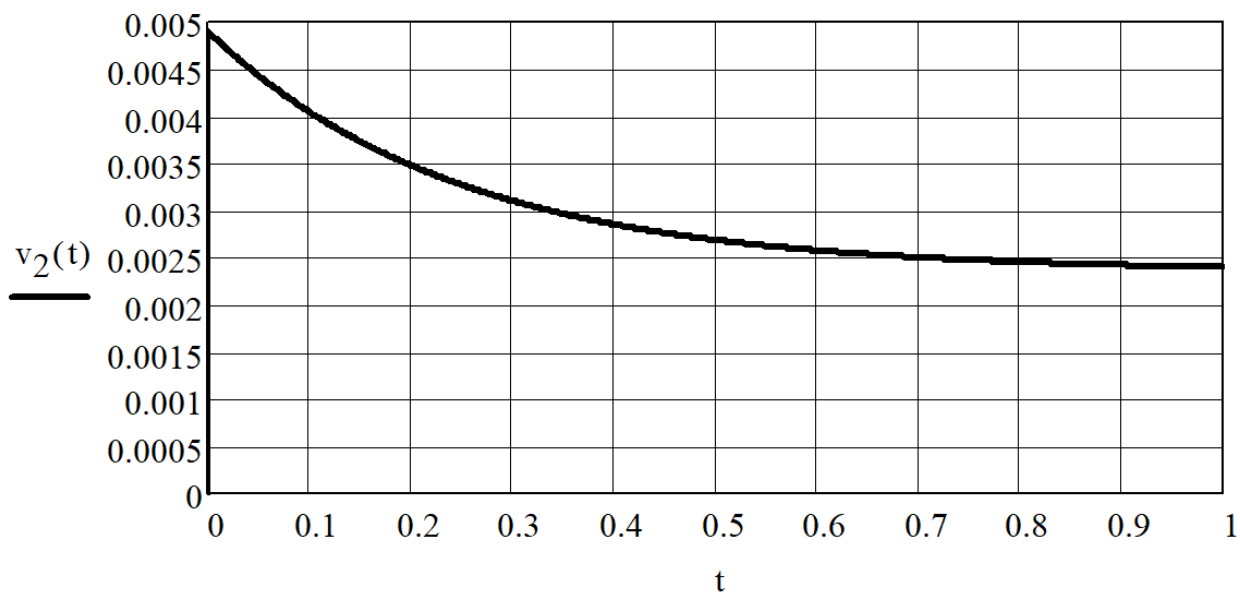


Рисунок 4. Графики изменения во времени t [с] линейных координат y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 [м]





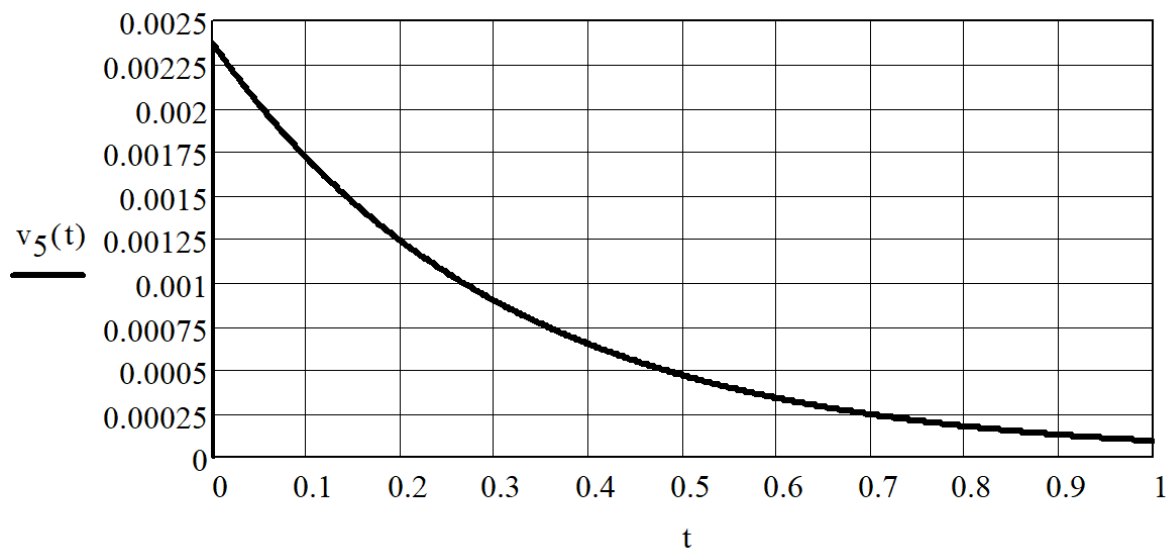
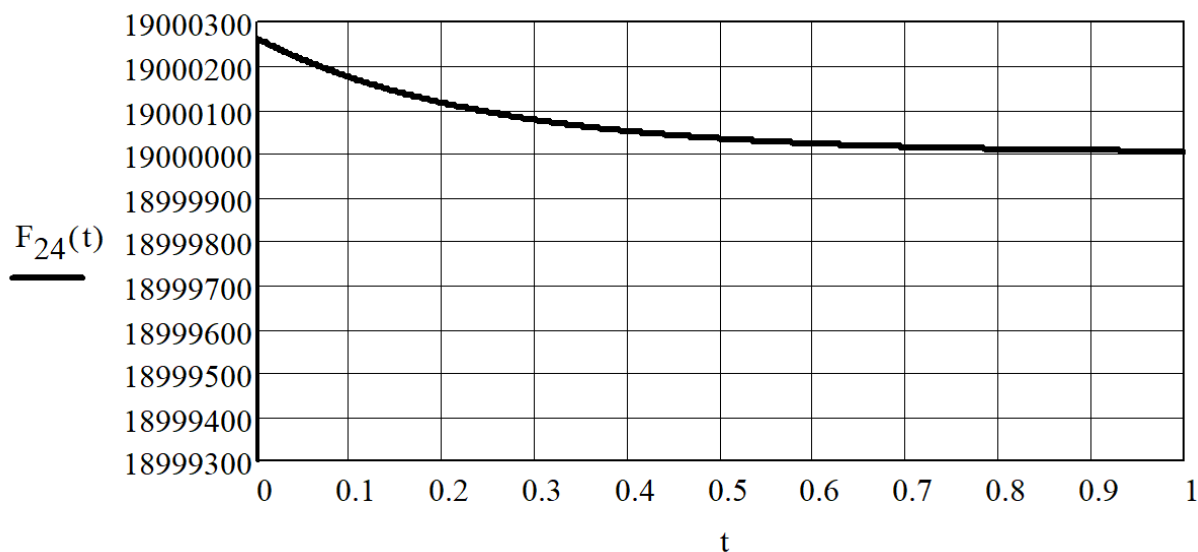
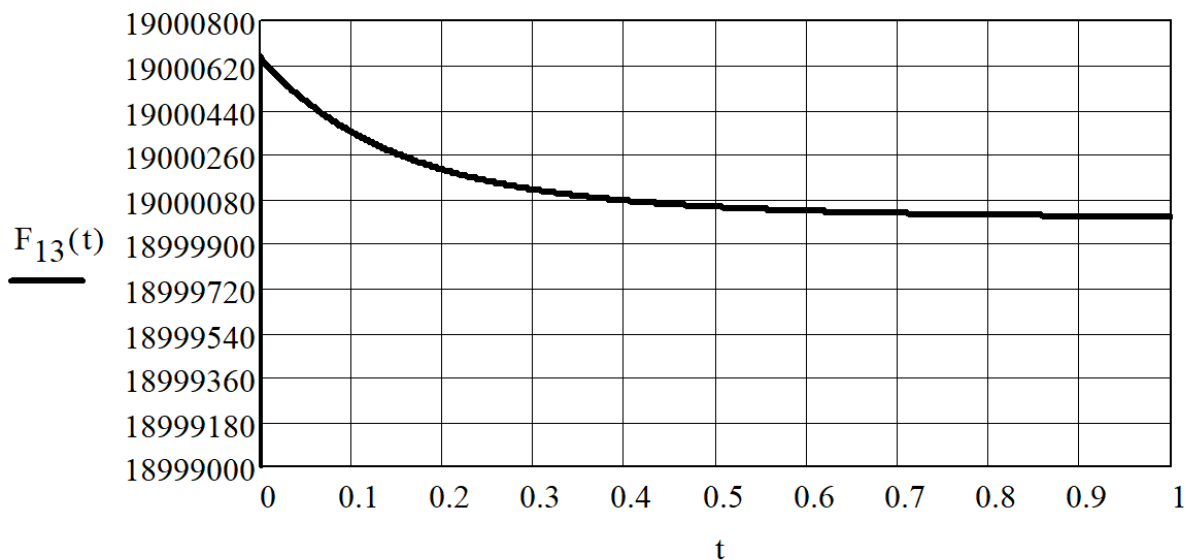


Рисунок 5. Графики изменения во времени t [с] линейных скоростей v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 [м/с]



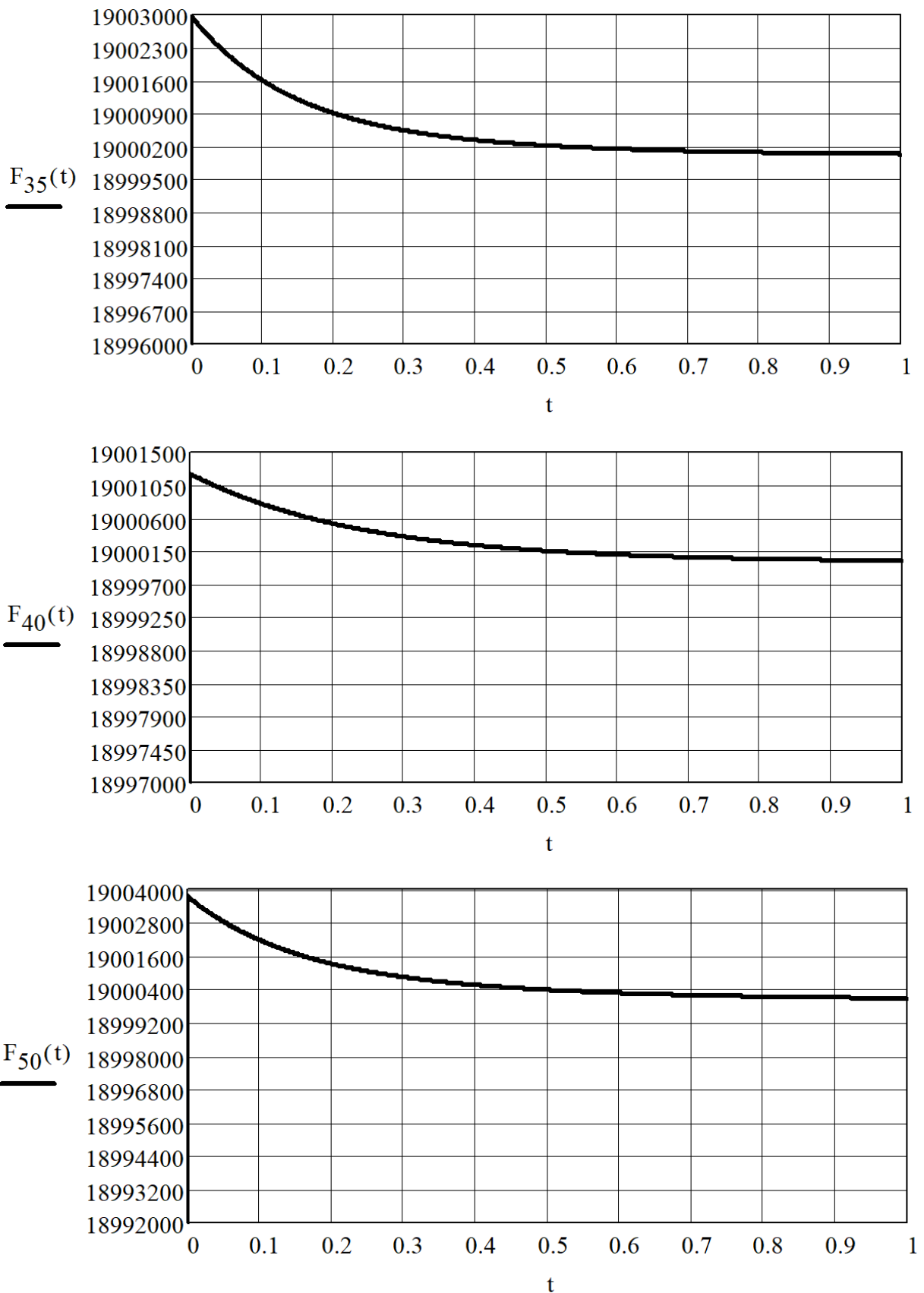


Рисунок 6. Графики изменения во времени t [с] упругих сил $F_{13}, F_{24}, F_{35}, F_{40}, F_{50}$ [Н]

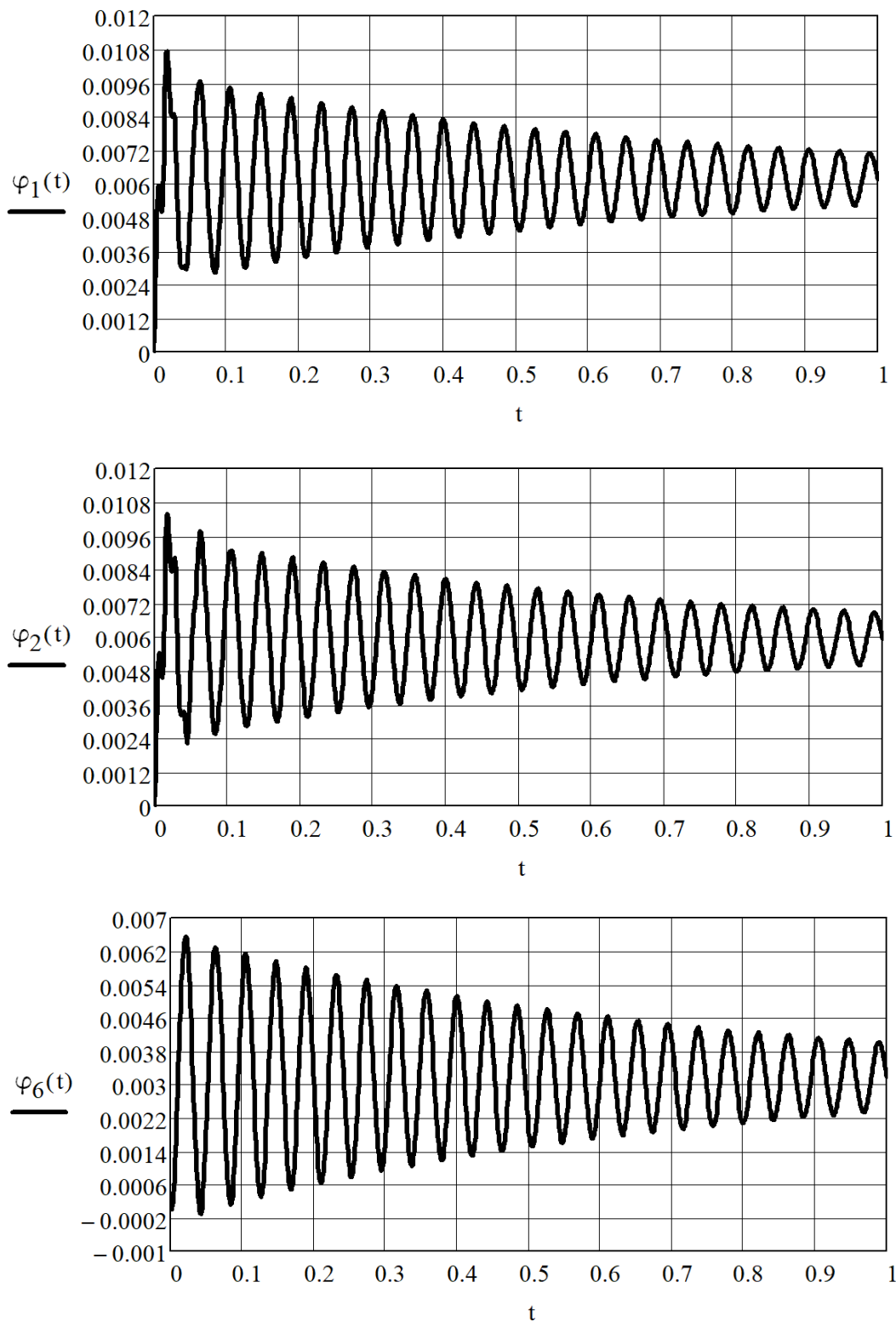


Рисунок 7. Графики изменения во времени t [с] угловых координат $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_6$ [рад]

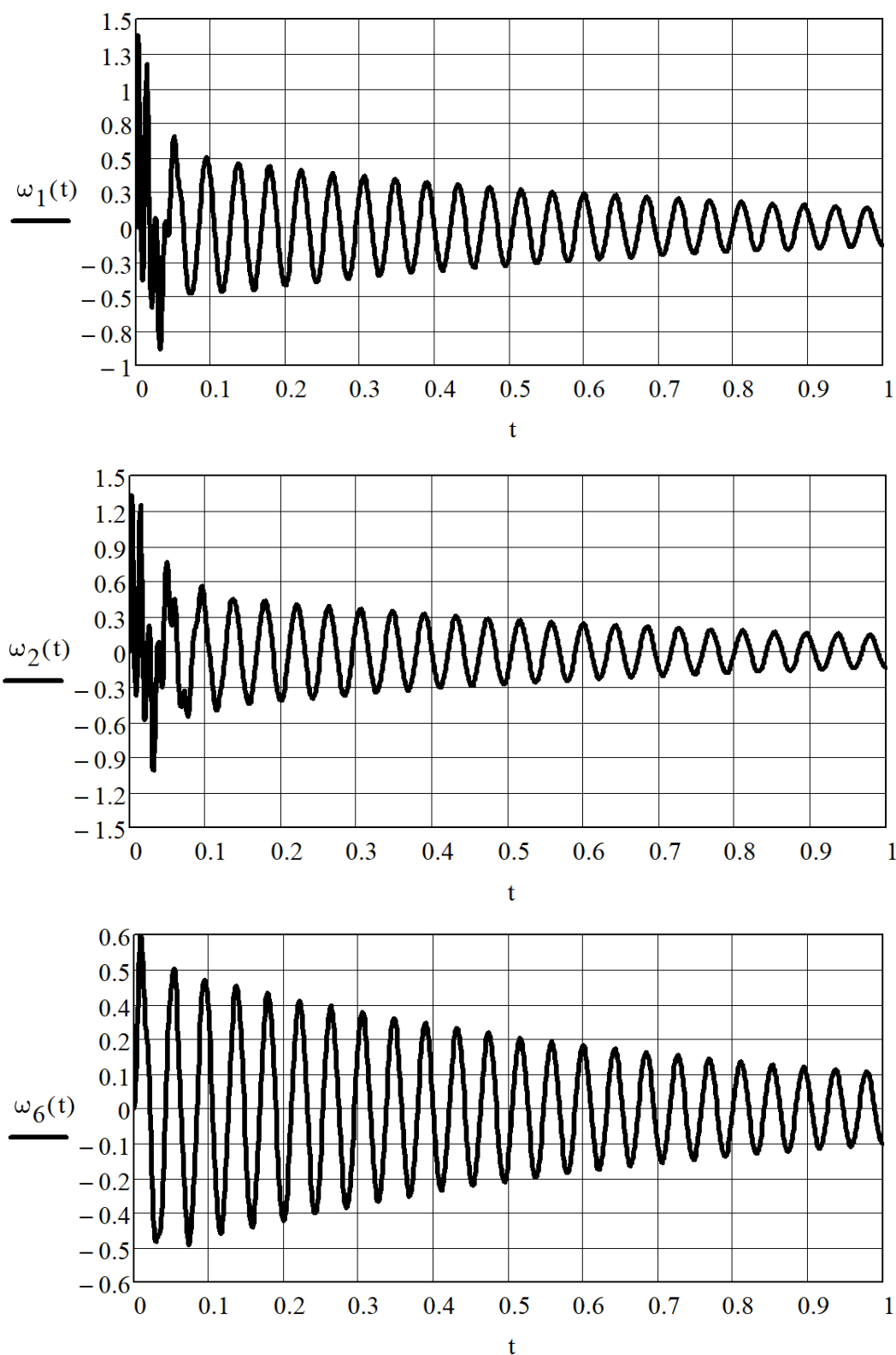


Рисунок 8. Графики изменения во времени t [с] угловых скоростей $\omega_1, \omega_2, \omega_6$ [рад/с]

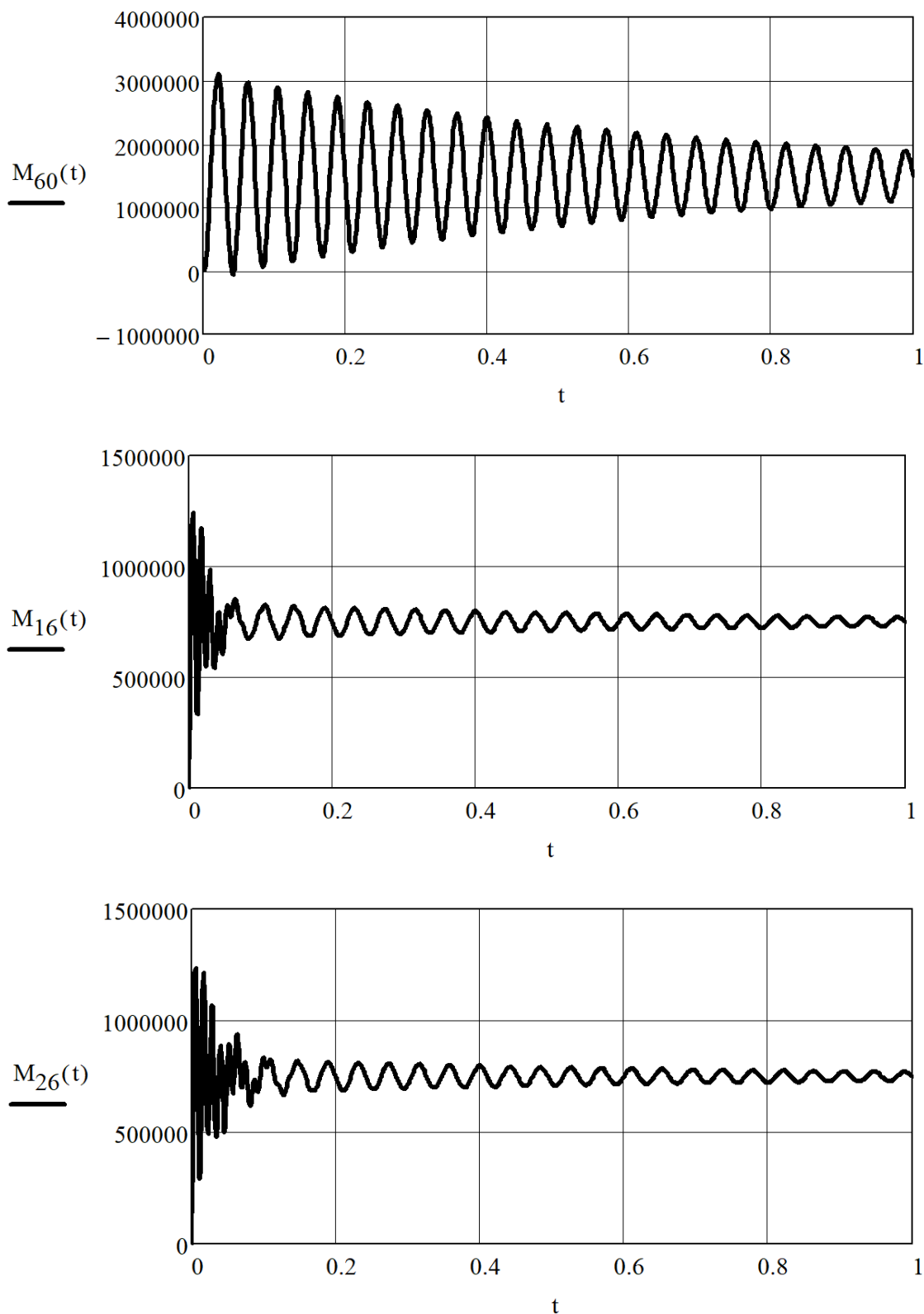


Рисунок 9. Графики изменения во времени t [с] моментов сил упругости M_{60}, M_{16}, M_{26} [Н·м]

Выводы

1. На графиках $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ и $y_5(t)$ на временном интервале $t \in [0, 1]$ не были обнаружены периодические продольные колебания.

2. На графиках $F_{13}(t), F_{24}(t), F_{35}(t), F_{40}(t)$ и $F_{50}(t)$ на временном интервале $t \in [0, 1]$ также не были обнаружены периодические колебания.

3. На графиках $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ и $\varphi_6(t)$ на временном интервале $t \in [0, 1]$ выявлены крутильные колебания с частотой 24 Гц.

4. На графиках $M_{60}(t), M_{16}(t)$ и $M_{26}(t)$ на временном интервале $t \in [0, 1]$ выявлены колебания с той же частотой 24 Гц.

5. На графике $M_{60}(t)$ видно, что коэффициент динамичности $K_{\text{дин}} = M_{60\text{ макс}}/M_{60\text{ уст}} = 3\,100\,000/1\,500\,000 \approx 2$.

6. На графике $M_{16}(t)$ видно, что коэффициент динамичности $K_{\text{дин}} = M_{16\text{ макс}}/M_{16\text{ уст}} = 1\,250\,000/750\,000 \approx 1,7$.

7. На графике $M_{26}(t)$ видно, что коэффициент динамичности $K_{\text{дин}} = M_{26\text{ макс}}/M_{26\text{ уст}} = 1\,250\,000/750\,000 \approx 1,7$.

8. Коэффициенты динамичности $K_{\text{дин}}$ целесообразно минимизировать, увеличив коэффициенты демпфирования $\mu_{13}, \mu_{24}, \mu_{35}, \mu_{40}, \mu_{50}$ и $\beta_{60}, \beta_{16}, \beta_{26}$ путем установки упругой муфты, дополнительных гидравлических демпферов и пружинных амортизаторов [2, 3].

Список литературы

1. Яковлев Р.А. Асимметричное нагружение прокатных станов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 84 с.
2. Мальцев А.А., Румянцева В.А. Оптимизация технологии и машины ОМД. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №2. С.105–116. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-2-2021/a230217>.
3. Мальцев А.А., Румянцева В.А. Оптимизация конструкции машины ОМД по критерию минимизации амплитуд механических колебаний. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №3. С.168–180. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-3-2021/a230248>.

References

1. Yakovlev R.A. Asymmetric loading of rolling mills. – Moscow: BMSTU, 2001.84 p.
2. Andrey A. Maltsev, Valentina A. Rummyantseva. Optimization of OMD technology and machine. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.2. P.105–116. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-2-2021/a230217>.
3. Andrey A. Maltsev, Valentina A. Rummyantseva. Optimization of the machine design OMD on the criterion of minimizing the amplitude of mechanical vibrations. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.3. P.168-180. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-3-2021/a230248>.