

УДК 621.771

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОМД**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**Валентина Анатольевна Румянцева**к.т.н., доцент кафедры ФН-7 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: valar@bmstu.ru**Аннотация**

Для изучения характера механических колебаний, возникающих в шестой рабочей клетки многоклетьевого прокатного стана 2000, а также в ее электроприводе, построена и реализована в среде MathCAD математическая модель. Обозначены пути оптимизации скоростного режима прокатки заготовки и конструкции этой машины обработки металлов давлением (ОМД) по критерию минимизации амплитуд механических колебаний.

Ключевые слова: машина ОМД, оптимизация, конструирование, прокатка.**OPTIMIZATION OF OMD TECHNOLOGY AND MACHINE****Andrey A. Maltsev**Candidate of Technical Sciences, Associate professor, BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Valentina A. Rumyantseva**associate professor, BMSTU ФН-7 Department
e-mail: valar@bmstu.ru**ABSTRACT**

To study the nature of mechanical vibrations occurring in the sixth working stand of the multicellular rolling mill 2000, as well as in its electric drive, a mathematical model is constructed and implemented in the MathCAD environment. The ways of optimizing the speed mode of rolling the billet and the design of this metal forming machine (OMD) are indicated according to the criterion of minimizing the amplitudes of mechanical vibrations.

Keywords: OMD machine, optimization, design, rolling.

Введение

Объект исследования – машина обработки металлов давлением (ОМД) – многоклетьевого прокатный стан 2000 Новолипецкого металлургического комбината (рис. 1)



Рисунок 1. Рабочие клетки прокатного стана 2000

Предмет исследования – технологический процесс ОМД – процесс горячей прокатки заготовки в шестой рабочей клетке.

Цель исследования – оптимизация технологии и конструкции машины ОМД по критерию минимизации амплитуд механических колебаний – научный поиск оптимальных вариантов изменения скоростного режима прокатки заготовки и реконструкции шестой клетки прокатного стана по результатам математического моделирования механических колебаний.

Задача исследования – построение и апробирование в компьютерной среде MathCAD математической колебательной модели шестой рабочей клетки, рассматриваемой вместе с ее электроприводом.

Материалы и методы исследования

Исходные данные – колебательная расчетная схема шестой рабочей клетки и ее электропривода (рис. 2).

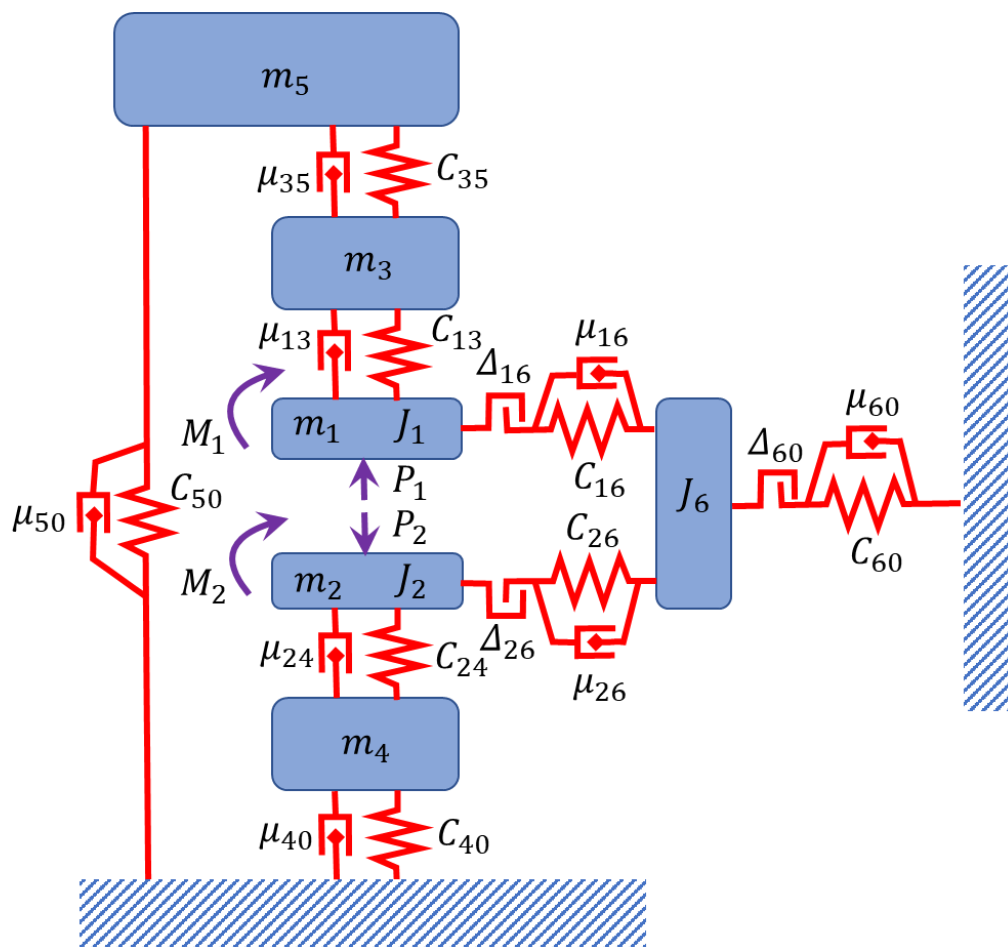


Рисунок 2. Расчетная схема объекта исследования [1]

Из литературного источника [1], нами были взяты числовые значения следующих параметров колебательной модели:

- ✓ $m_1 = 24 \cdot 10^3$ кг – масса комплекта верхнего рабочего валка;
- ✓ $m_2 = 25 \cdot 10^3$ кг – масса комплекта нижнего рабочего валка;
- ✓ $m_3 = 86 \cdot 10^3$ кг – масса комплекта верхнего опорного валка;
- ✓ $m_4 = 90 \cdot 10^3$ кг – масса комплекта нижнего опорного валка;
- ✓ $m_5 = 100 \cdot 10^3$ кг – приведенная масса верхней части рабочей клетки;
- ✓ $J_1 = 1 \cdot 10^3$ кг·м² – момент инерции верхнего рабочего валка;
- ✓ $J_2 = 1 \cdot 10^3$ кг·м² – момент инерции нижнего рабочего валка;
- ✓ $J_6 = 2 \cdot 9\,507 \approx 19 \cdot 10^3$ кг·м² – суммарный момент инерции двух

шестеренных валков;

- ✓ $C_{60} = 472 \cdot 10^6$ Н·м/рад – жесткость моторного участка привода;
- ✓ $C_{16} = 250 \cdot 10^6$ Н·м/рад – жесткость верхнего шпинделя;
- ✓ $C_{26} = 270 \cdot 10^6$ Н·м/рад – жесткость нижнего шпинделя;
- ✓ $C_{13} = 60 \cdot 10^6$ Н·м/рад – жесткость контакта верхних валков;
- ✓ $C_{24} = 60 \cdot 10^6$ Н·м/рад – жесткость контакта нижних валков;

- ✓ $C_{40} = 31 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ – жесткость элементов рабочей клетки на участке между нижним опорным валком и нижними поперечинами;
- ✓ $C_{35} = 57 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ – жесткость элементов рабочей клетки на участке между верхним опорным валком и гайками нажимных винтов;
- ✓ $C_{50} = 26 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ – жесткость от верхних поперечин станин до их лап;
- ✓ $\mu_{60} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования моторного участка электропривода;
- ✓ $\mu_{16} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования верхнего шпинделя;
- ✓ $\mu_{26} = 60 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования нижнего шпинделя;
- ✓ $\mu_{13} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования в области контакта верхних рабочего и опорного валков;
- ✓ $\mu_{24} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования в области контакта нижних рабочего и опорного валков;
- ✓ $\mu_{40} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования элементов рабочей клетки на участке между нижним опорным валком и нижними поперечинами;
- ✓ $\mu_{35} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования элементов рабочей клетки на участке между верхним опорным валком и гайками нажимных винтов;
- ✓ $\mu_{50} = 8 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент демпфирования станин от верхних поперечин до лап;
- ✓ $\Delta_{60} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ – зазор на моторном участке электропривода;
- ✓ $\Delta_{16} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ – полный зазор в шарнирах верхнего шпинделя;
- ✓ $\Delta_{26} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ – полный зазор в шарнирах нижнего шпинделя;
- ✓ $M_1 = 750 \cdot 10^3 \text{ Н}$ – установившийся момент прокатки на верхнем рабочем валке;
- ✓ $M_2 = 750 \cdot 10^3 \text{ Н}$ – установившийся момент прокатки на нижнем рабочем валке.

По известным установившимся моментам прокатки были найдены ориентировочные значения сил прокатки, действующих на верхний (P_1) и нижний (P_2) рабочие валки:

$$P_1 = P_2 = \frac{M_1}{\psi \sqrt{R\Delta h}} = \frac{M_2}{\psi \sqrt{R\Delta h}} \approx \frac{750 \cdot 10^3}{0,5 \cdot \sqrt{0,4 \cdot 0,016}} = 19 \cdot 10^6 \text{ Н}, \quad (1)$$

где $\psi = 0,67 \dots 0,3$ – пределы изменения коэффициента плеча силы прокатки по данным М.Л. Зароцинского и А.И. Гришкова [2]; $R = 400 \text{ мм}$ – радиус рабочего валка; $\Delta h = 16 \text{ мм}$ – абсолютное обжатие.

Жозеф Луи Лагранж – крупнейший французский математик 18 века, переформулировавший классическую механику, – ввел функцию Лагранжа

$$L(q_i, \dot{q}_i, t), \quad (2)$$

где L – Лагранжиан; q_i – обобщенные координаты (координаты продольно-колеблющихся масс рабочей клетки, а также угловые координаты крутильно-колеблющихся масс электропривода), \dot{q}_i – обобщенная скорость (первая производная обобщенной координаты по времени); $i = 1, 2, \dots, n$ (n – число степеней свободы системы); t – время.

Дифференциальные уравнения Лагранжа 2 рода имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (3)$$

где T – кинетическая энергия колебательной системы; Q_i – обобщенные силы (силы и моменты прокатки).

В соответствии с расчетной схемой (рис. 2) на основании уравнений Лагранжа 2 рода (3) построена математическая модель (без учета зазоров) механических колебаний, возникающих в шестой клетки и ее электроприводе после удара переднего конца заготовки о рабочие валки:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d^2 \varphi_1(t)}{dt^2} + M_{16}(t) = M_1; \\ J_2 \frac{d^2 \varphi_2(t)}{dt^2} + M_{26}(t) = M_2; \\ J_6 \frac{d^2 \varphi_6(t)}{dt^2} - M_{16}(t) - M_{26}(t) + M_{60}(t) = 0; \\ m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + F_{13}(t) = P_1; \\ m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + F_{24}(t) = P_2; \\ m_3 \frac{d^2 y_3(t)}{dt^2} - F_{13}(t) + F_{35}(t) = 0; \\ m_4 \frac{d^2 y_4(t)}{dt^2} + F_{40}(t) - F_{24}(t) = 0; \\ m_5 \frac{d^2 y_5(t)}{dt^2} + F_{50}(t) - F_{35}(t) = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

где M_{60}, M_{16}, M_{26} – упругие моменты (5); $F_{13}, F_{24}, F_{35}, F_{40}, F_{50}$ – упругие силы (5); $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_6$ – угловые координаты крутильно-колеблющихся масс привода; y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – координаты продольно-колеблющихся масс рабочей клетки.

Упругие моменты и силы, вошедшие в (4), математически записаны так:

$$\begin{aligned} M_{60}(t) &= C_{60} \varphi_6(t) + \mu_{60} \frac{d\varphi_6(t)}{dt}; \\ M_{16}(t) &= C_{16} [\varphi_1(t) - \varphi_6(t)] + \mu_{16} \left[\frac{d\varphi_1(t)}{dt} - \frac{d\varphi_6(t)}{dt} \right]; \\ M_{26}(t) &= C_{26} [\varphi_2(t) - \varphi_6(t)] + \mu_{26} \left[\frac{d\varphi_2(t)}{dt} - \frac{d\varphi_6(t)}{dt} \right]; \\ F_{13}(t) &= C_{13} [y_1(t) - y_3(t)] + \mu_{13} \left[\frac{dy_1(t)}{dt} - \frac{dy_3(t)}{dt} \right]; \\ F_{24}(t) &= C_{24} [y_2(t) - y_4(t)] + \mu_{24} \left[\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_4(t)}{dt} \right]; \\ F_{35}(t) &= C_{35} [y_3(t) - y_5(t)] + \mu_{35} \left[\frac{dy_3(t)}{dt} - \frac{dy_5(t)}{dt} \right]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$F_{40}(t) = C_{40} y_4(t) + \mu_{40} \frac{dy_4(t)}{dt};$$

$$F_{50}(t) = C_{50} y_5(t) + \mu_{50} \frac{dy_5(t)}{dt}.$$

Начальные условия:

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = \varphi_6(0) = 0;$$

$$\frac{d\varphi_1(0)}{dt} = \frac{d\varphi_2(0)}{dt} = \frac{d\varphi_6(0)}{dt} = 0;$$

$$y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = y_4(0) = y_5(0) = 0;$$

$$\frac{dy_1(0)}{dt} = \frac{dy_2(0)}{dt} = \frac{dy_3(0)}{dt} = \frac{dy_4(0)}{dt} = \frac{dy_5(0)}{dt} = 0; \quad (6)$$

$$M_{60}(0) = M_{16}(0) = M_{26}(0) = 0;$$

$$F_{13}(0) = F_{24}(0) = F_{35}(0) = F_{40}(0) = F_{50}(0) = 0.$$

Метод исследования – метод Рунге-Кутты четвертого порядка – метод решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем.

Математическая модель запрограммирована в среде MathCAD:

$$m_1 := 24 \cdot 10^3 \quad J_1 := 1 \cdot 10^3 \quad C_{60} := 472 \cdot 10^6 \quad \mu_{60} := 60 \cdot 10^3$$

$$m_2 := 25 \cdot 10^3 \quad J_2 := 1 \cdot 10^3 \quad C_{16} := 250 \cdot 10^6 \quad \mu_{16} := 60 \cdot 10^3$$

$$m_3 := 86 \cdot 10^3 \quad J_6 := 19 \cdot 10^3 \quad C_{26} := 270 \cdot 10^6 \quad \mu_{26} := 60 \cdot 10^3$$

$$m_4 := 90 \cdot 10^3 \quad C_{13} := 60 \cdot 10^6 \quad \mu_{13} := 8 \cdot 10^9$$

$$m_5 := 100 \cdot 10^3 \quad C_{24} := 60 \cdot 10^6 \quad \mu_{24} := 8 \cdot 10^9$$

$$M_1 := 750 \cdot 10^3 \quad C_{40} := 31 \cdot 10^9 \quad \mu_{40} := 7.5 \cdot 10^9$$

$$M_2 := 750 \cdot 10^3 \quad C_{35} := 57 \cdot 10^9 \quad \mu_{35} := 7.5 \cdot 10^9$$

$$P_1 := \frac{M_1}{0.5 \cdot \sqrt{0.4 \cdot 0.016}} \quad C_{50} := 26 \cdot 10^9 \quad \mu_{50} := 8 \cdot 10^9$$

$$P_1 = 1.9 \times 10^7 \quad P_2 := P_1$$

Given

$$\begin{array}{lll}
 \varphi_1(0) = 0 & \varphi_{1'}(0) = 0 & M_{60}(0) = 0 \\
 \varphi_2(0) = 0 & \varphi_{2'}(0) = 0 & M_{16}(0) = 0 \\
 \varphi_6(0) = 0 & \varphi_{6'}(0) = 0 & M_{26}(0) = 0 \\
 y_1(0) = 0 & y_{1'}(0) = 0 & F_{13}(0) = 0 \\
 y_2(0) = 0 & y_{2'}(0) = 0 & F_{24}(0) = 0 \\
 y_3(0) = 0 & y_{3'}(0) = 0 & F_{35}(0) = 0 \\
 y_4(0) = 0 & y_{4'}(0) = 0 & F_{40}(0) = 0 \\
 y_5(0) = 0 & y_{5'}(0) = 0 & F_{50}(0) = 0
 \end{array}$$

$$M_{60}(t) = C_{60} \cdot \varphi_6(t) + \mu_{60} \cdot \varphi_{6'}(t)$$

$$M_{16}(t) = C_{16} \cdot (\varphi_1(t) - \varphi_6(t)) + \mu_{16} \cdot (\varphi_{1'}(t) - \varphi_{6'}(t))$$

$$M_{26}(t) = C_{26} \cdot (\varphi_2(t) - \varphi_6(t)) + \mu_{26} \cdot (\varphi_{2'}(t) - \varphi_{6'}(t))$$

$$F_{13}(t) = C_{13} \cdot (y_1(t) - y_3(t)) + \mu_{13} \cdot (y_{1'}(t) - y_{3'}(t))$$

$$F_{24}(t) = C_{24} \cdot (y_2(t) - y_4(t)) + \mu_{24} \cdot (y_{2'}(t) - y_{4'}(t))$$

$$F_{35}(t) = C_{35} \cdot (y_3(t) - y_5(t)) + \mu_{35} \cdot (y_{3'}(t) - y_{5'}(t))$$

$$F_{40}(t) = C_{40} \cdot y_4(t) + \mu_{40} \cdot y_{4'}(t)$$

$$F_{50}(t) = C_{50} \cdot y_5(t) + \mu_{50} \cdot y_{5'}(t)$$

$$J_1 \cdot \varphi_1''(t) + M_{16}(t) = M_1$$

$$J_2 \cdot \varphi_2''(t) + M_{26}(t) = M_2$$

$$J_6 \cdot \varphi_6''(t) - M_{16}(t) - M_{26}(t) + M_{60}(t) = 0$$

$$m_1 \cdot y_1''(t) + F_{13}(t) = P_1$$

$$m_2 \cdot y_2''(t) + F_{24}(t) = P_2$$

$$m_3 \cdot y_3''(t) - F_{13}(t) + F_{35}(t) = 0$$

$$m_4 \cdot y_4''(t) + F_{40}(t) - F_{24}(t) = 0$$

$$m_5 \cdot y_5''(t) + F_{50}(t) - F_{35}(t) = 0$$

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

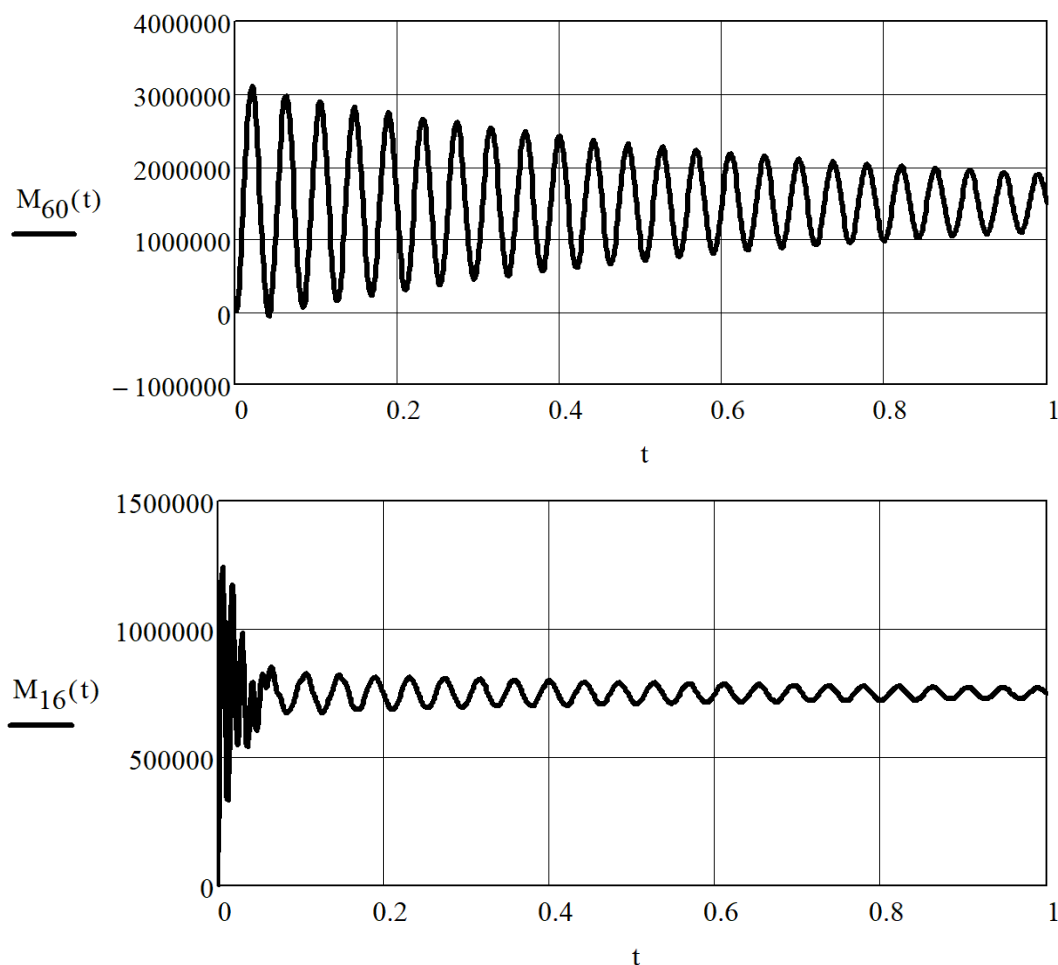
Кроме вычислительного блока Given – Odesolve автор планирует в будущем для решения нежестких дифференциальных уравнений использовать следующие встроенные в MathCAD функции: Rkadapt (метод Рунге-Кутты с настраиваемым шагом), Rkfixed (метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом), Adams (метод Адамса) и Bulstoer (метод Булирша-Штера).

В MathCAD встроены также функции BDF (backward differentiation formula), Radau (алгоритм RADAUS), Stiffb (метод Булирша-Штера), Stiffr (метод Розенброка) для решения жестких дифференциальных уравнений и функция AdamsBDF для решения как жестких, так и нежестких уравнений.

Все эти функции имеют формат (init, X1, X2, intvls, D) и возвращают на временном интервале [X1, X2] матрицу с решением задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. Параметр init задает вектор начальных условий, а параметр intvls – число строк матрицы результатов. D – векторная функция с правой частью уравнения.

Полученные результаты

Получены графические результаты математического моделирования в среде MathCAD (рис. 3, 4).



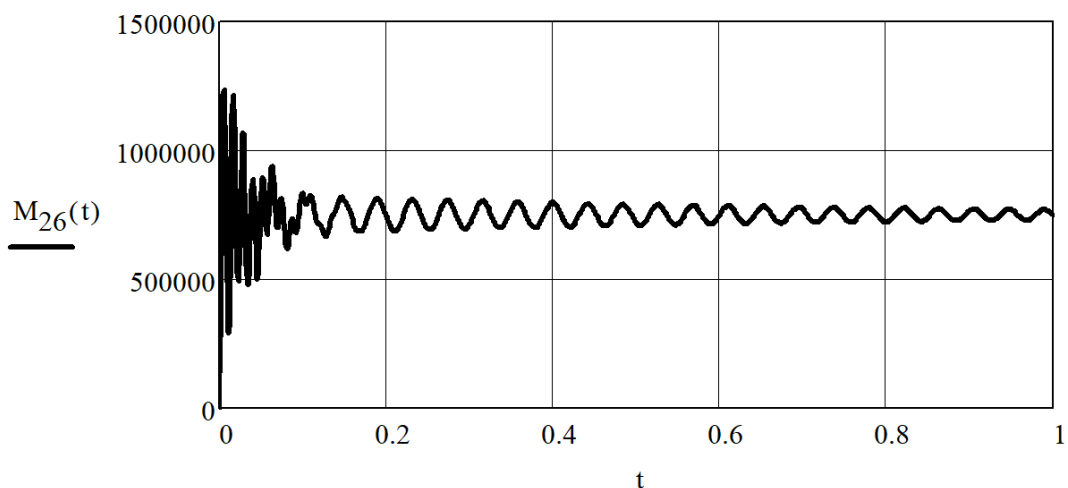
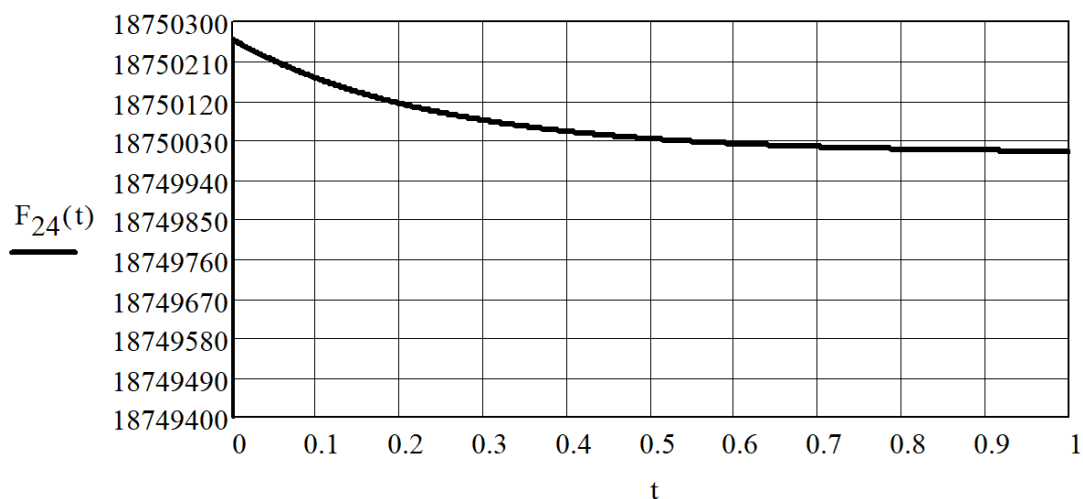
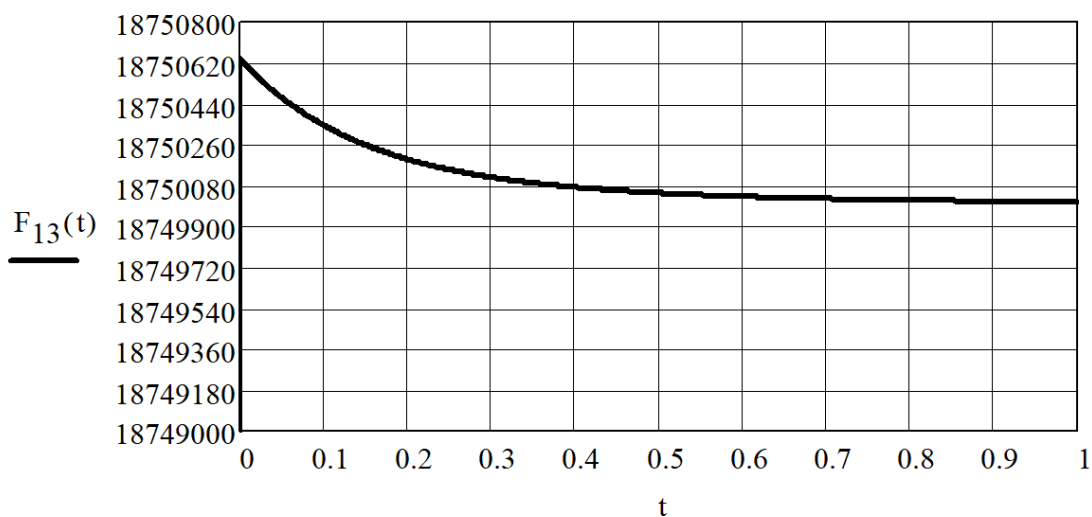


Рисунок 3. Крутильные колебания в электроприводе



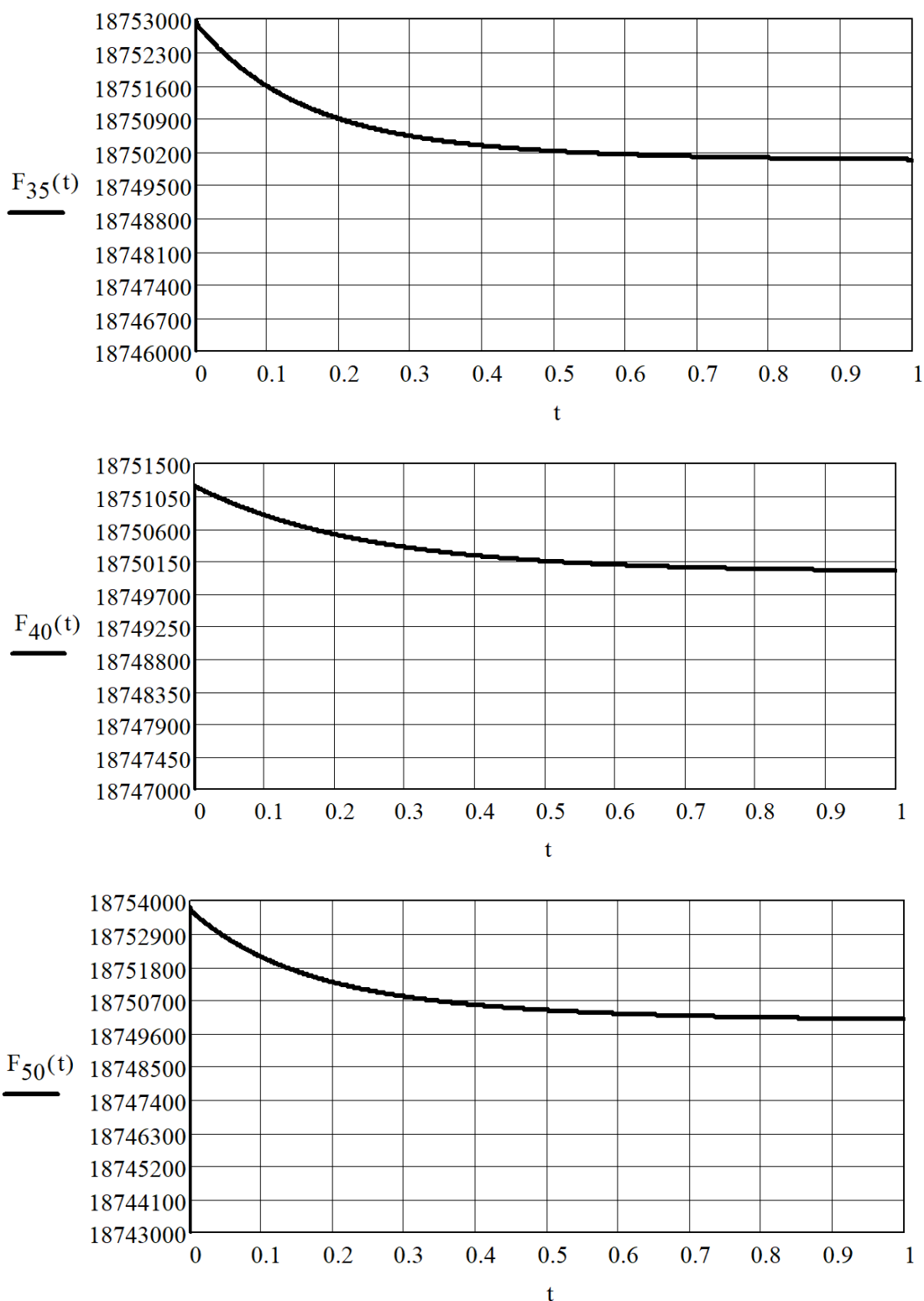


Рисунок 4. Продольные колебания в рабочей клетке

Оптимизация скоростного режима прокатки заготовки представляет собой противоречивую задачу, требующую дополнительного изучения: с одной стороны, минимизация скорости прокатки значительно снизит производительность прокатного стана, а с другой стороны, чем меньше скорость прокатки, тем слабее будет удар переднего конца заготовки о рабочие валки и тем меньше ожидаемые амплитуды механических колебаний.

Оптимизация конструкции машины ОМД по критерию минимизации амплитуд механических колебаний может привести к установке упругих муфт, маховиков, гидравлических демпферов и пружинных амортизаторов.

Выводы

1. По результатам обработки компьютерных графиков на временном интервале $t \in [0,1]$ сделаны выводы, доказывающие адекватное поведение построенной математической модели шестой клетки прокатного стана 2000.
2. Компьютерное исследование механических колебаний – это первый и очень важный шаг на пути многокритериальной оптимизации технологии и конструкции перспективной машины ОМД на стадии ее проектирования [3].
3. Настоящая статья может быть полезна, в первую очередь, студентам, изучающим дисциплину «Основы динамики и надежности металлургического оборудования», а также при проведении ими оригинальных исследований в рамках курсового или дипломного проектирования.

Список литературы

1. Яковлев Р.А. Асимметричное нагружение прокатных станов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 84 с.
2. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 400 с.
3. Мальцев А.А. Оптимизация конструкции машины ОМД. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №1. – С.140–147. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-1-2021/a230196>.

References

1. Yakovlev R.A. Asymmetric loading of rolling mills. – Moscow: BMSTU, 2001. – 84 p.
2. Nikitin G.S. Theory of continuous longitudinal rolling. – Moscow: BMSTU, 2009. – 400 p.
3. Maltsev A. A. Optimization of the design of the OMD machine. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.1. – P.140-147. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-1-2021/a230196>.