



УДК 621.31:621.771.06-88

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Анатолий Иванович Мальцев

доц., к.т.н., последнее место работы ЭПИ МИСиС
144006, Электросталь, Первомайская ул.,7
Российская Федерация
a.a.mal@mail.ru

Андрей Анатольевич Мальцев

доц. кафедры МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул.1
Российская Федерация,
bauman@bmstu.ru

Аннотация

В статье исследуется надежность металлургической машины (прокатного стана). Большое место в работе занимает рассмотрение надежности узлов и деталей главной линии стана в зависимости от их сроков службы. Представлена методика подсчета вероятности безотказной работы через заданное время (12 ч., сутки, месяц и т.д.). Основным методом при проведении подобных исследований является математическое моделирование с помощью аналоговых или электронных вычислительных машин. Работы в этом направлении ведутся достаточно интенсивно.

Ключевые слова: рабочие органы, линия привода, работоспособность машины, моделирование.

Calculation of reliability of the metallurgical machine

Anatoly I. Maltsev

ass., Ph. D., last place of work EPI MISIS
144006, Elektrostal, Pervomayskaya str., 7
Russian Federation,
El Republic.mail a.a.mal@mail.ru

Andrey A. Maltsev

Assoc. Chair Mt-10 mstu Bmstu
105005, Moscow, 2-I Baumanskaya Street
Russian Federation,
E. mail bauman@bmstu.ru

ABSTRACT

The article examines the reliability of a metallurgical machine (rolling mill). A large place in the work is the consideration of the reliability of components and parts of the main line of the mill, depending on their service life. The article provides a method for calculating the probability of failure-free operation after a given time (12 hours, days, months, etc.). the Main method for conducting such studies is mathematical modeling using analog or electronic computers. Work in this direction is carried out quite intensively.

Keywords: workers crate, line drive, the performance of the rolling mill, modeling.

Введение

Расчет надежности работы металлургической машины, а точнее прокатного стана, является достаточно актуальной задачей. Целью работы является расчет вероятности безотказной работы узлов и деталей, в условиях динамики в соединениях главной линии прокатного стана, и ее влияние на работоспособность прокатного стана (рис. 1).

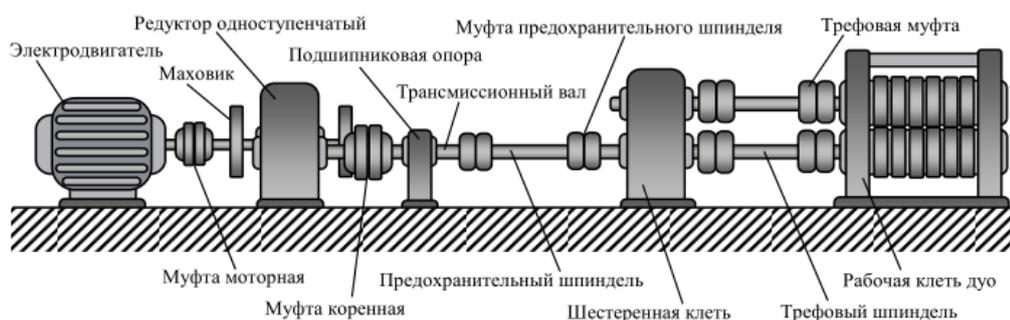


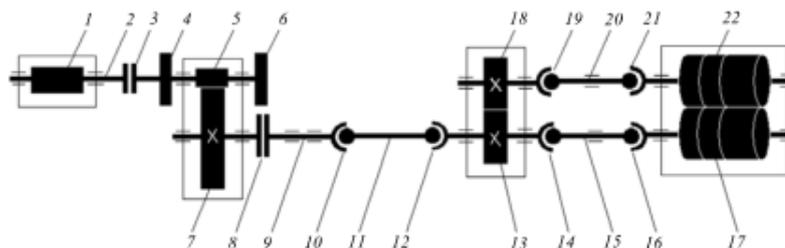
Рис. 1. Главная линия привода автоматического стана 220

Материалы и методы исследования

Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1].

Поломки металлургических машин часто приводят к значительным убыткам, связанным как с дороговизной и трудоемкостью ремонтных работ, так и с потерями от долгого простоя высокопроизводительного оборудования.

Для расчета на ЭВМ амплитуд и частот крутильных колебаний, возникающих в процессе прокатки, построена в среде MathCAD динамическая модель электропривода стана [2], позволяющая провести расчеты на циклическую ограниченную долговечность узлов и деталей прокатного стана, рис.2.



1 – электродвигатель, 2 – вал электродвигателя, 3 – муфта моторная, 4 – маховик, 5 – (цилиндрический редуктор с маховиками) шестерня редуктора, 6 – маховик, 7 – (цилиндрический редуктор с маховиками), колесо редуктора, 8 – муфта коренная, 9 – вал, 10 – (универсальные шпиндели) головка предохранительного шпинделя, 11 – (универсальные шпиндели) предохранительный шпиндель, 12 – (универсальные шпиндели) головка предохранительного шпинделя, 13 – (шестеренная клеть) нижняя шестерня, 14 – (универсальные шпиндели) головка нижнего шпинделя, 15 – (универсальные шпиндели) нижний шпиндель, 16 – универсальные шпиндели) головка нижнего шпинделя, 17 – (рабочая клеть) нижний рабочий валок, 18 – (шестеренная клеть) верхняя шестерня, 19 – (универсальные шпиндели) головка верхнего шпинделя, 20 – (универсальные шпиндели), верхний шпиндель, 21 – (универсальные шпиндели) головка верхнего шпинделя, 22 – (рабочая клеть) верхний рабочий валок.

Рис. 2. Кинематическая схема стана с одноступенчатым цилиндрическим редуктором

Математическое моделирование в компьютерной среде MathCAD является одним из эффективных методов изучения сложных механических систем.

В математическом пакете MathCAD для численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений реализован алгоритм классического метода Рунге-Кутты, имеющего четвертый порядок точности.

Дифференциальные уравнения движения массивных дисков во времени t составляются на основании уравнений Лагранжа II рода:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + m_1 = M_1 \\ J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} - m_1 + m_2 = 0 \\ J_3 \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} - m_2 + m_3 + m_4 = 0 \\ J_4 \frac{d^2 \varphi_4}{dt^2} - m_3 = -M_2 \\ J_5 \frac{d^2 \varphi_5}{dt^2} - m_4 = -M_3 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} \\ \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d^2 \varphi_4}{dt^2} = \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d^2 \varphi_5}{dt^2} = \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – внутренние моменты, возникающие при скручивании упругих связей

$$\begin{aligned} m_1 &= c_1(\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 &= c_2(\varphi_2 - \varphi_3) \\ m_3 &= c_3(\varphi_3 - \varphi_4) \\ m_4 &= c_4(\varphi_3 - \varphi_5) \end{aligned}$$

Для учета люфтов в упругих связях [2], дифференциальные уравнения движения (1) попарно вычитались друг из друга, в результате чего записана следующая система, состоящая из четырех уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \psi_1}{dt^2} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} - \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} - \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d^2 \psi_3}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d^2 \psi_4}{dt^2} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{array} \right. \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} m_1 &= c_1 \psi_1; & \psi_1 &= (\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 &= c_2 \psi_2; & \psi_2 &= (\varphi_2 - \varphi_3) \\ m_3 &= c_3 \psi_3; & \psi_3 &= (\varphi_3 - \varphi_4) \\ m_4 &= c_4 \psi_4; & \psi_4 &= (\varphi_3 - \varphi_5) \end{aligned}$$

Для удобства программирования в среде MathCAD система из четырех дифференциальных уравнений второго порядка (2) преобразована в систему из восьми дифференциальных уравнений первого порядка

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_1}{dt} = \psi_5 \\ \frac{d\psi_2}{dt} = \psi_6 \\ \frac{d\psi_3}{dt} = \psi_7 \\ \frac{d\psi_4}{dt} = \psi_8 \\ \frac{d\psi_5}{dt} = \frac{M_1 - m_1}{J_1} - \frac{m_1 - m_2}{J_2} \\ \frac{d\psi_6}{dt} = \frac{m_1 - m_2}{J_2} - \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} \\ \frac{d\psi_7}{dt} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_3 - M_2}{J_4} \\ \frac{d\psi_8}{dt} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{J_3} - \frac{m_4 - M_3}{J_5} \end{array} \right. \quad (3)$$

Моменты сил упругости с учетом демпфирования и люфтов имеют вид, рис. 3.

$$m_1 = \begin{cases} c_1(\psi_1 - \Delta_1) + \beta_1 \psi_5 & , \quad \psi_1 > \Delta_1 \\ 0 & , \quad -\Delta_1 \leq \psi_1 \leq \Delta_1 \\ c_1(\psi_1 + \Delta_1) + \beta_1 \psi_5 & , \quad \psi_1 < -\Delta_1 \end{cases}$$

$$m_2 = \begin{cases} c_2(\psi_2 - \Delta_2) + \beta_2 \psi_6 & , \quad \psi_2 > \Delta_2 \\ 0 & , \quad -\Delta_2 \leq \psi_2 \leq \Delta_2 \\ c_2(\psi_2 + \Delta_2) + \beta_2 \psi_6 & , \quad \psi_2 < -\Delta_2 \end{cases}$$

$$m_3 = \begin{cases} c_3(\psi_3 - \Delta_3) + \beta_3 \psi_7 & , \quad \psi_3 > \Delta_3 \\ 0 & , \quad -\Delta_3 \leq \psi_3 \leq \Delta_3 \\ c_3(\psi_3 + \Delta_3) + \beta_3 \psi_7 & , \quad \psi_3 < -\Delta_3 \end{cases}$$

$$m_4 = \begin{cases} c_4(\psi_4 - \Delta_4) + \beta_4 \psi_8 & , \quad \psi_4 > \Delta_4 \\ 0 & , \quad -\Delta_4 \leq \psi_4 \leq \Delta_4 \\ c_4(\psi_4 + \Delta_4) + \beta_4 \psi_8 & , \quad \psi_4 < -\Delta_4 \end{cases} \quad (4)$$

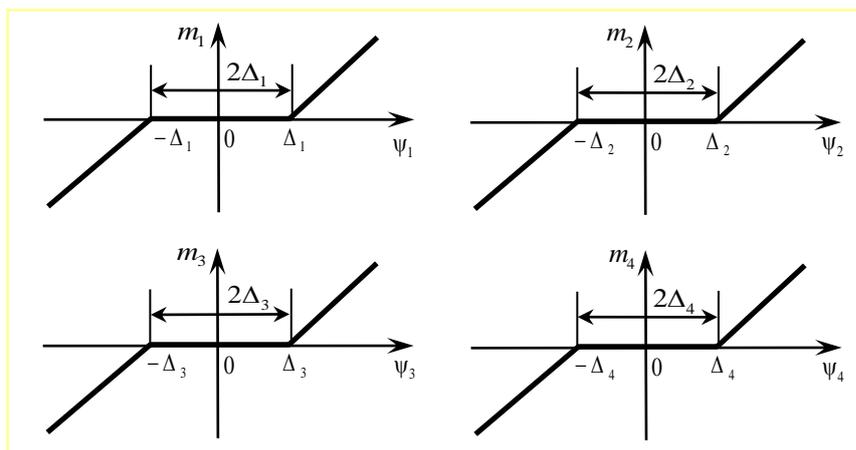


Рис. 3. Кусочно-линейные функции моментов сил упругости

Угловые координаты $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ являются искомыми величинами, изменяющимися во времени, причем интерес представляют не сами угловые координаты, а моменты сил упругости M_1, M_2, M_3, M_4 .

Все остальные параметры динамической модели (1) – моменты инерции J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 ; жесткости c_1, c_2, c_3, c_4 ; демпферы $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$; люфты $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$; внешние моменты M_1, M_2, M_3 – задаются в компьютерную программу как константы.

При настройке динамической модели коэффициенты демпфирования $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и β_4 подбирают так, чтобы достигалось наибольшее сходство результата математического моделирования с результатом эксперимента по прокатке заготовки.

Момент на валу электродвигателя при прокатке

$$M_{\text{эд}} = \frac{M_{\text{п}}}{i_{\text{рд}} \eta_{\text{пр}}} + M_{\text{эд.х.х}} + M_{\text{эд.д}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{п}}$ – момент прокатки; $M_{\text{эд.х.х}}$ – момент холостого хода электродвигателя; $M_{\text{эд.д}}$ – динамический момент электродвигателя; $i_{\text{рд}}$ – передаточное число редуктора; $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода;

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{м.м}} \eta_{\text{рд}} \eta_{\text{м.к}} \eta_{\text{ш.кл}} \eta_{\text{шп}}^2 = 0,76,$$

где $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя; $\eta_{\text{эд}} = 0,91$; $\eta_{\text{м.м}}$ – КПД моторной муфты; $\eta_{\text{м.м}} = 0,98$; $\eta_{\text{рд}}$ – КПД редуктора; $\eta_{\text{рд}} = 0,97$; $\eta_{\text{м.к}}$ – КПД коренной муфты; $\eta_{\text{м.к}} = 0,98$; $\eta_{\text{ш.кл}}$ – КПД шестеренной клетки; $\eta_{\text{ш.кл}} = 0,97$; $\eta_{\text{шп}}$ – КПД шпинделя; $\eta_{\text{шп}} = 0,96$.

При построении динамической модели сделано допущение, что ротор электродвигателя вращается равномерно. При этом внешние моменты определяются по формуле

$$M_1 = \frac{M_2 + M_3}{i_p \eta};$$

$$M_2(t) = \begin{cases} M_{1\text{осц}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\zeta}} \right), & t < t_{\Pi} \\ M_{1\text{осц}}, & t \geq t_{\Pi} \end{cases} \quad (6)$$

$$M_3(t) = \begin{cases} M_{2\text{осц}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\zeta}} \right), & t < t_{\Pi} \\ M_{2\text{осц}}, & t \geq t_{\Pi} \end{cases}$$

где i_p – передаточное число редуктора; η – КПД электропривода; $M_{1\text{осц}}$, $M_{2\text{осц}}$ – найденные по осциллограммам установившиеся моменты прокатки, приходящиеся на верхний и нижний рабочие валки; $\zeta = (0,4 \dots 0,5)t_{\Pi}$ – показатель экспоненты нарастания моментов прокатки; t_{Π} – время захвата заготовки рабочими валками.

То есть внешние моменты M_2 , M_3 , действующие на четвертую и пятую массы со стороны рабочих валков, заданы как экспоненциально-линейные функции времени, рис. 4.

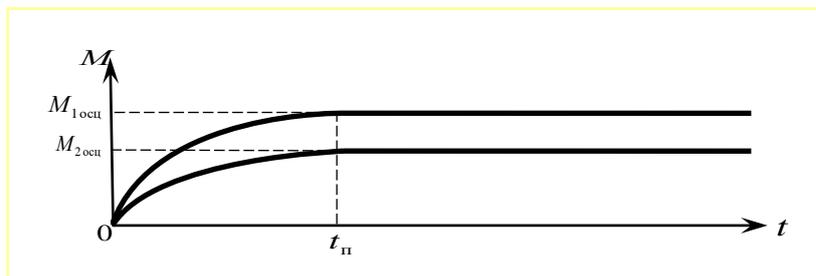


Рис. 4. Экспоненциально-линейные функции моментов прокатки

Задан вектор-столбец начальных условий интегрирования

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_1}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_2}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_3}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_4}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_5}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_6}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_7}{dt}(0) \\ \frac{d\psi_8}{dt}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Задаем символьный вектор \mathbf{S} дифференциальных уравнений движения вращающихся масс (1):

$$\mathbf{S}(t, \mathbf{X}) = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{12} \\ \frac{1}{J_1 i_{\text{рд}} \eta} M_3 + \frac{1}{J_1 i_{\text{рд}} \eta} M_4 - \left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right) M_{12} - \frac{1}{J_2} M_{23} - \frac{1}{J_2} M_{24} \\ \omega_{23} \\ \frac{1}{J_2} M_{12} - \left(\frac{1}{J_2} - \frac{1}{J_3} \right) M_{23} - \frac{1}{J_2} M_{24} - \frac{1}{J_3} M_3 \\ \omega_{24} \\ \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_{23} - \left(\frac{1}{J_2} - \frac{1}{J_4} \right) M_{24} - \frac{1}{J_4} M_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

где $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ – элементы символьного вектора \mathbf{S} ; t – переменная времени, изменяющаяся в интервале от нуля до значения всего времени прокатки $t_{\text{зг}}$.

После подстановки в (7) выражений для внутренних моментов сил упругости (4), записанных с учетом демпфирования и зазоров, и внешних моментов (6), действующих со стороны рабочих валков, получим полную математическую запись для каждого элемента символьного вектора \mathbf{S} :

$$S_1 = \omega_{12};$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{M_{3\pi}}{J_1 i_{\text{рд}} \eta} \left(1 - e^{-\frac{t}{\zeta}} \right), & \text{при } t < t_{\text{зг}} \\ \frac{M_{3\pi}}{J_1 i_{\text{рд}} \eta}, & \text{при } t \geq t_{\text{зг}} \end{cases} + \begin{cases} \frac{M_{4\pi}}{J_1 i_{\text{рд}} \eta} \left(1 - e^{-\frac{t}{\zeta}} \right), & \text{при } t < t_{\text{зг}} \\ \frac{M_{4\pi}}{J_1 i_{\text{рд}} \eta}, & \text{при } t \geq t_{\text{зг}} \end{cases} -$$

$$\begin{aligned}
 & -\left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2}\right) \left\{ \begin{array}{l} c_{12} \left(\psi_{12} - \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, \text{ при } \psi_{12} > \frac{\Delta_{12}}{2} \\ 0, \text{ при } -\frac{\Delta_{12}}{2} \leq \psi_{12} \leq \frac{\Delta_{12}}{2} \\ c_{12} \left(\psi_{12} + \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, \text{ при } \psi_{12} < -\frac{\Delta_{12}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{l} c_{23} \left(\psi_{23} - \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, \text{ при } \psi_{23} > \frac{\Delta_{23}}{2} \\ 0, \text{ при } -\frac{\Delta_{23}}{2} \leq \psi_{23} \leq \frac{\Delta_{23}}{2} \\ c_{23} \left(\psi_{23} + \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, \text{ при } \psi_{23} < -\frac{\Delta_{23}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{l} c_{24} \left(\psi_{24} - \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, \text{ при } \psi_{24} > \frac{\Delta_{24}}{2} \\ 0, \text{ при } -\frac{\Delta_{24}}{2} \leq \psi_{24} \leq \frac{\Delta_{24}}{2} \\ c_{24} \left(\psi_{24} + \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, \text{ при } \psi_{24} < -\frac{\Delta_{24}}{2} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

$$s_3 = \omega_{23};$$

$$\begin{aligned}
 & s_4 = \frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{l} c_{12} \left(\psi_{12} - \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, \text{ при } \psi_{12} > \frac{\Delta_{12}}{2} \\ 0, \text{ при } -\frac{\Delta_{12}}{2} \leq \psi_{12} \leq \frac{\Delta_{12}}{2} \\ c_{12} \left(\psi_{12} + \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, \text{ при } \psi_{12} < -\frac{\Delta_{12}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\left(\frac{1}{J_2} - \frac{1}{J_3}\right) \left\{ \begin{array}{l} c_{23} \left(\psi_{23} - \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, \text{ при } \psi_{23} > \frac{\Delta_{23}}{2} \\ 0, \text{ при } -\frac{\Delta_{23}}{2} \leq \psi_{23} \leq \frac{\Delta_{23}}{2} \\ c_{23} \left(\psi_{23} + \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, \text{ при } \psi_{23} < -\frac{\Delta_{23}}{2} \end{array} \right. -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{ll} c_{24} \left(\psi_{24} - \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, & \text{при } \psi_{24} > \frac{\Delta_{24}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{24}}{2} \leq \psi_{24} \leq \frac{\Delta_{24}}{2} \\ c_{24} \left(\psi_{24} + \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, & \text{при } \psi_{24} < -\frac{\Delta_{24}}{2} \end{array} \right. \\
 & -\frac{1}{J_3} \left\{ \begin{array}{ll} M_{3п} \left(1 - e^{-\frac{t}{\varsigma}} \right) & \text{при } t < t_{пзг} \\ M_{3п} & \text{при } t \geq t_{пзг} \end{array} \right. \\
 s_5 = \omega_{24} \\
 & s_6 = \frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{ll} c_{12} \left(\psi_{12} - \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, & \text{при } \psi_{12} > \frac{\Delta_{12}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{12}}{2} \leq \psi_{12} \leq \frac{\Delta_{12}}{2} \\ c_{12} \left(\psi_{12} + \frac{\Delta_{12}}{2} \right) + \beta_{12} \frac{d\psi_{12}}{dt}, & \text{при } \psi_{12} < -\frac{\Delta_{12}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\frac{1}{J_2} \left\{ \begin{array}{ll} c_{23} \left(\psi_{23} - \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, & \text{при } \psi_{23} > \frac{\Delta_{23}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{23}}{2} \leq \psi_{23} \leq \frac{\Delta_{23}}{2} \\ c_{23} \left(\psi_{23} + \frac{\Delta_{23}}{2} \right) + \beta_{23} \frac{d\psi_{23}}{dt}, & \text{при } \psi_{23} < -\frac{\Delta_{23}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\left(\frac{1}{J_2} - \frac{1}{J_4} \right) \left\{ \begin{array}{ll} c_{24} \left(\psi_{24} - \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, & \text{при } \psi_{24} > \frac{\Delta_{24}}{2} \\ 0, & \text{при } -\frac{\Delta_{24}}{2} \leq \psi_{24} \leq \frac{\Delta_{24}}{2} \\ c_{24} \left(\psi_{24} + \frac{\Delta_{24}}{2} \right) + \beta_{24} \frac{d\psi_{24}}{dt}, & \text{при } \psi_{24} < -\frac{\Delta_{24}}{2} \end{array} \right. - \\
 & -\frac{1}{J_4} \left\{ \begin{array}{ll} M_{4п} \left(1 - e^{-\frac{t}{\varsigma}} \right), & \text{при } t < t_{зг} \\ M_{4п}, & \text{при } t \geq t_{зг} \end{array} \right. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Система уравнений (8), с учетом (6) решена методом Рунге-Кутты, для чего использована встроенная функция **Rkadapt** [3], имеющая формат **Rkadapt [X(0), 0, t_{пр}, N, S(t, X)]**.

Функция **Rkadapt** возвращает матрицу решений для системы обыкновенных

дифференциальных уравнений с начальными условиями $X(0)$, правые части которых записаны в символьном векторе $S(t, X)$, на заданном интервале времени $[0 \ t_{3г}]$. Количество точек решения $N = 1000$.

В результате решения системы уравнений (8) на ЭВМ определяются неизвестные переменные величины $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6$, что позволяет вычислить моменты сил упругости, следовательно, и $\tau_{пр i}$ – приведенное напряжение i -го повреждающего цикла напряжений

$$\begin{aligned} M_{12} &= c_{12}\chi_1 + \beta_{12}\chi_4 \\ M_{23} &= c_{23}\chi_2 + \beta_{23}\chi_5 \\ M_{24} &= c_{24}\chi_3 + \beta_{24}\chi_6, \end{aligned} \quad (9)$$

В общем случае ресурс шпинделя, выраженный количеством прокатанных «тяжелых» заготовок до появления первой макроскопической трещины, определяется по формуле Серенсена- Когаева [1,3]:

$$N_{заг} = \frac{\alpha_{кор} \cdot \tau_{-l шпин}^m \cdot N_0}{\sum_{i=1}^n \tau_{пр i}^m}, \quad (10)$$

где $\tau_{пр i}$ – приведенное напряжение i -го повреждающего цикла напряжений, превышающее величину $0,6 \cdot \tau_{-l шпин}$; n – число повреждающих циклов.

Корректирующий коэффициент $\alpha_{кор}$ определяется как

$$\alpha_{кор} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{пр i}}{n_{цик} - 0,6 \tau_{-l шпин}} \geq 0,2, \quad (11)$$

где $n_{цик}$ – общее число циклов на осциллограмме напряжений, учтенное за время переходного процесса, рис.5.

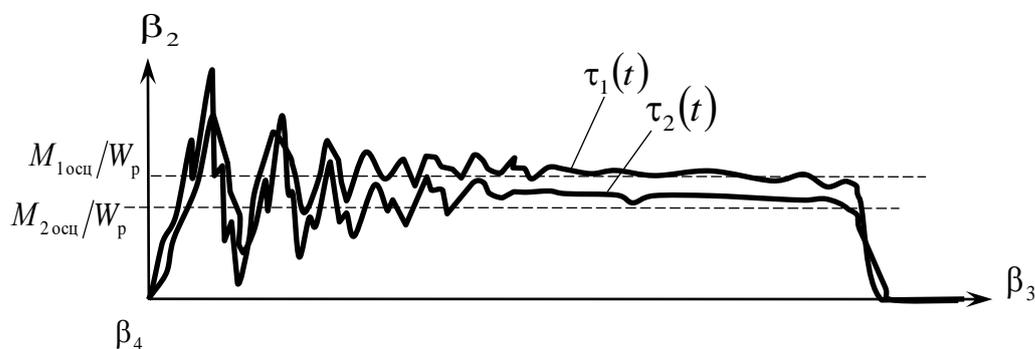


Рис. 5. Графики нагрузки шпинделей

Медианный ресурс узла, показанный на рис. 6, равен

$$T_{сл} = l_{\delta} \cdot \lambda_{\delta}; \quad (12)$$

где l_{δ} – блок нагружения (1 год); λ_{δ} – число блоков нагружения,

$$\lambda_{\delta} = \frac{a_p \cdot \tau_{-lg \min}^m \cdot N_0}{\sum_{\tau_{ai} \geq \tau_{-lg \min}} \tau_{ai}^m \cdot v_{i\delta}} ; \quad (13)$$

где a_p – корректированное значение суммы накопленных повреждений,

$$a_p = \frac{\sum \tau_{ai} \cdot t_i - b \cdot \tau_{-lg}}{\tau_{a \max} - b \cdot \tau_{-lg}} ; \quad (14)$$

где τ_{\max} и τ_{ai} – максимальная и i -ая амплитуда блока нагружения; τ_{-lg} – уровень предела выносливости; b – коэффициент, учитывающий нижнюю границу амплитудных напряжений, оказывающих повреждающее действие,

$b = 0,6$.

При использовании полулогарифмической системы координат

$$\lambda_{\delta} = \frac{N_0 \cdot 10^{\frac{\tau_{ai}}{K}} \cdot a_p}{\sum v_{i\delta} \cdot 10^{\frac{\tau_{ai}}{K}} \cdot \left(\frac{\tau_{\max}}{\tau_{ai}} \right)^m} ; \quad (15)$$

где $v_{i\delta}$ – число циклов повторения i -ой амплитуды в блоке нагружения.

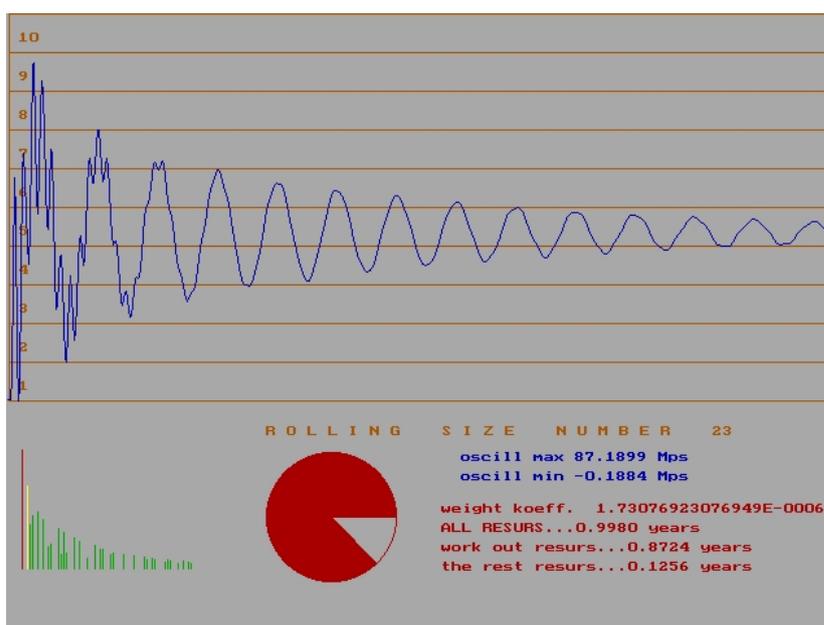


Рис. 6. Ресурс предохранительного шпинделя автоматического стана 220

Интенсивность отказов предохранительного шпинделя автоматического стана 220 составляет

$$\lambda_{o1} = 1 / 0,998 \cdot T_{\text{эф}} = 1 / 0,998 \cdot (8640 - 291) = 1 / 0,998 \cdot 8349 = 1 / 8300 = 0,1 \cdot 10^{-5} / \text{ч.},$$

где $T_{\text{эф}}$ – эффективный годовой фонд рабочего времени при непрерывном графике работы оборудования.

Интенсивность отказов предохранительного шпинделя автоматического стана 220 с учетом коэффициента K_j составляет

$$\lambda_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-5} = 0,2 \cdot 10^{-5} / \text{ч.}$$

Величина $N_j \lambda_j = 0,2 \cdot 10^{-5} / \text{ч}$, т.к. $N_1 = 1$ (один предохранительный шпиндель).

Результаты и обсуждение

Результаты расчета интенсивности отказов остальных узлов и деталей главной линии привода автоматического стана 220 сведены в таблицу.

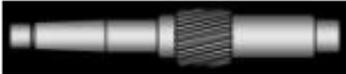
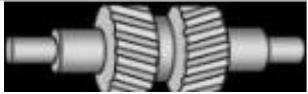
Переход от системы планово- предупредительной системы ремонтов (ППР) к системе ремонтов по фактическому состоянию, т.е. по результатам комплексного диагностирования исправности или неисправности деталей и узлов, необходим по ряду технических и экономических причин.

Серьезный недостаток общепринятой системы ППР заключается в том, что план ремонтов прокатного стана составляется по среднестатистическим данным о выходе из строя деталей и узлов. Такой ремонт по регламенту зачастую приводит к замене исправного оборудования и не исключает аварии между ремонтами.

Пусть дана машина, для деталей которой известно число отказов в час. таблица [4,5,6,7]. Найдем среднюю наработку (суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние) для установки и вероятность внезапного отказа (вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет) в течении 12 часов, суток, месяца, года.

Таблица

Интенсивность отказов остальных узлов и деталей главной линии привода автоматического стана 220

№ узла рис.2	Название узла, детали	Эскиз узла, детали	Момент инерции, J кг/м ²	Жесткос ть, С Нм/рад	Интенсив ность отказов $\lambda_{oj} \cdot 10^{-6}$ 1/ч	Интенси вность отказов $\lambda_j =$ $\lambda_{oj} \cdot 10^{-6} \cdot K_j$ 1/ч	$N_j \lambda_j$ 10^{-6} 1/ч
1	Ротор электродви гателя		$J_{рот}$ 0,7	$C_{рот}$ $9,12 \cdot 10^5$	0,9	1,8	1,8
3	Муфта моторная		$J_{мм}$ 0,334	$C_{мм}$ ∞	0,15	0,3	0,3
8	Муфта коренная		$J_{мк}$ 0,882	$C_{мк}$ ∞	0,4	0,8	0,8
5	Быстроход ный вал - шестерня		$J_б$ 0,01	$C_б$ $5,83 \cdot 10^5$	0,7	1,4	1,4
7	Тихоходны й вал		$J_т$ 0,099	$C_т$ $7,54 \cdot 10^6$	0,3	0,5	0,5
7	Зубчатое колесо тихоходног о вала		$J_{зкт}$ 31,6	$C_{зкт}$ ∞	0,01	0,02	0,02
13/18	Нижний/ Верхний шестеренн ый валок		$J_{ншп} / J_{вшп}$ 0,061	$C_{ншп} / C_{вшп}$ $5,64 \cdot 10^5$	0,2	0,4	0,8
20/15	Шпиндели		$J_{вшп} / J_{ншп}$ 0,029	$C_{вшп} / C_{ншп}$ $5,97 \cdot 10^5$	0,3	0,6	1,2

Предохранительный шпиндель, поз. № 11 является предохранительным устройством, рабочие валки, поз. №№17,22 – технологическим оборудованием.

Суммарное значение интенсивности отказов без учета предохранительного устройства и технологического инструмента $\lambda = 8 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$.

Средняя наработка на отказ для стана

$$m_t = 1/\lambda = 1/8 \cdot 10^{-6} = 124 \cdot 10^3 \text{ час}$$

(16)

Вероятность безотказной работы стана в течение заданной наработки

$$P(t_i) = \exp(-\lambda \cdot t_i) \sim 1 - \lambda \cdot t_i, \quad (17)$$

где t_i – время наработки на отказ, час

Вероятность безотказной работы стана в течение 12 час

$$P(t_i) = \exp(-\lambda \cdot t_i) \sim 1 - \lambda \cdot t_i = 1 - 12 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sim 0,9999$$

Вероятность безотказной работы стана в течение 24 час

$$P(t_i) = \exp(-\lambda \cdot t_i) \sim 1 - \lambda \cdot t_i = 1 - 24 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sim 0,9999$$

Вероятность безотказной работы стана в течение года ($8,3 \cdot 10^3$ час)

$$P(t_i) = \exp(-\lambda \cdot t_i) \sim 1 - \lambda \cdot t_i = 1 - 8,3 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sim 0,9$$

Вероятность безотказной работы стана в течение 10 лет ($8,3 \cdot 10^4$ час)

$$P(t_i) = \exp(-\lambda \cdot t_i) \sim 1 - \lambda \cdot t_i = 1 - 8,3 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sim 0,5 \text{ – объект неработоспособен.}$$

Выводы

Проведено исследование надежности металлургической машины (прокатного стана) в зависимости от сроков службы узлов и деталей. В статье дается методика подсчета вероятности безотказной работы через заданное время (12 ч., сутки, месяц и т.д.).

Для расчета на ЭВМ амплитуд и частот крутильных колебаний, возникающих в процессе прокатки, построена в среде MathCAD динамическая модель электропривода стана [2], позволяющая провести расчеты на циклическую ограниченную долговечность узлов и деталей прокатного стана.

Найдена средняя наработка (суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние) для установки и вероятность внезапного отказа (вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет) в течении 12 часов, суток, месяца, года.

Список литературы

1. Колесников А.Г., Яковлев Р.А., Мальцев А.А. Технологическое оборудование прокатного производства / А.Г. Колесников. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. – 158с.
2. Мальцев А.А., В.А. Соболев, И.В. Кожевников. Исследование в среде MathCAD крутильных колебаний электропривода стана дуо-160. «Инженерный вестник», № 09, 2014. С.96 – 102.
3. Мальцев А.А. Расчет в среде MATHCAD динамических напряжений в опасном сечении вала шпинделя стана дуо-160. Механическое оборудование металлургических заводов. 2014. №3. С. 64 – 70.
4. Мальцев А.А. Теоретическое исследование циклической нагруженности деталей электропривода клетки дуо-160. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. №6. С. 71 – 84.

5. Vafin R.K., Akhmedshin R.I., Mal'tsev A.I., Mal'tsev A.A., Alekseev P.L. Creation of system for monitoring the rolling equipment. Steel, Ed: "Intermet Engineering, M.2001. №11. С. 62 – 64.
6. Мальцев А. А. Диагностика и мониторинг технического состояния металлургических машин черной металлургии. Черная металлургия. 2013 № 1 (1367). С. 59 – 66.
7. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах. Мариуполь: ПГТУ, 2008.- 246с.

References

1. Kolesnikov A. G., Yakovlev R. A., Maltsev A. A. Technological equipment of rolling production / A. G. Kolesnikov. Moscow: MGTU Publishing house. N. E. Bauman. 2014. – 158с.
2. Maltsev A. A., V. A. Sobolev, I. V. Kozhevnikov. Research in MathCAD torsional vibrations of electric mill Duo-160. "Engineering Bulletin", № 09, 2014. P. 96 – 102.
3. Maltsev A. A. Calculation in MATHCAD environment of dynamic stresses in the dangerous section of the spindle shaft of the Duo-160 mill Mechanical equipment of metallurgical plants. 2014. No. 3. P. 64 – 70.
4. Maltsev A. A. Theoretical study of cyclic loading of electric drive parts of the stand Duo-160. Machines and installations: design, development and operation. 2015. No. 6. P. 71 – 84.
5. R. K. Vafin, R. Akhmetshin I. Mal'cev, A. I., Maltsev A. A., Alekseev L. P. With creation of system for monitoring of the rolling equipment. Steel, Ed: "Intermet Engineering, M.: 2001. No. 11. P. 62 – 64.
6. Maltsev A. A. Diagnostics and monitoring of technical condition of metallurgical machines of ferrous metallurgy. Ferrous metallurgy. 2013 № 1 (1367). P. 59 – 66.
7. Artyukh V. G. Load and overload in metallurgical machines. Mariupol: PSTU, 2008.- 246с.