

УДК 669.019.02/09

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА СТАНА ДУО-КВАРТО 320 ХП

Рамиль Вильданович Абдряшитов

*Студент 6 курса*

*кафедра «Оборудование и технологии прокатки»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.А. Мальцев,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»*

Объектом исследования является электропривод (валопровод) реверсивного прокатного стана [1] дуо-кварто 320 ХП, предназначенного для холодной прокатки листов и полосы толщиной от 3...4 мм до 0,1 мм с допуском 10% и шириной 100...200 мм из прецизионных сплавов – пермаллой, пермендюр, сплавов инварного и эливарного классов на основе Fe-Ni-Co [2]. Эти высоколегированные прецизионные сплавы требуют узких пределов содержания элементов в химическом составе, специальной выплавки и обработки.

Прецизионные сплавы согласно ГОСТ 10994-74 «Сплавы прецизионные. Марки» подразделяют в зависимости от основных свойств на следующие группы:

I — магнитно-мягкие, обладающие высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой в слабых полях;

II — магнитно-твердые сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса или петли гистерезиса, соответствующей полю максимальной проницаемости;

III — сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения;

IV — сплавы с заданными свойствами упругости, обладающие высокими упругими свойствами в сочетании с другими специальными свойствами (повышенной коррозионной устойчивостью, повышенной прочностью, низкой магнитной проницаемостью, заданными значениями модуля нормальной упругости и температурным коэффициентом модуля упругости);

IV — сверхпроводящие сплавы, характеризующиеся специальными электрическими свойствами в области низких температур;

V — сверхпроводящие сплавы, характеризующие специальными электрическими свойствами в области низких температур;

VI — сплавы с высоким электрическим сопротивлением, обладающие необходимым сочетанием электрических и других свойств;

VII — термобиметаллы, представляющие материал, состоящий из двух или более слоев металлов или сплавов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, разность которых обеспечивает его упругую деформацию при изменении температуры.

Химические элементы в марках обозначены следующими буквами: Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, К — кобальт, Л — бериллий, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ю — алюминий, Х — хром, Ф — ванадий.

Прецизионные сплавы применяются в электротехнике как магнитно-мягкие, магнитно-твердые, сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения, с заданными свойствами упругости, сверхпроводящие сплавы, сплавы с высоким электрическим сопротивлением, термобиметаллы. Незаменимы при изготовлении узлов особо чувствительных приборов и установок, уникальной экспериментальной и малогабаритной аппаратуры, различного рода датчиков, преобразователей энергии. Они используются также в бытовой технике, например в телевизорах, радиоприёмниках, часах и т.д.

К прецизионным сплавам относятся инвар, элинвар, манганин, константан, перминвар, пермендюр, пермаллой, алюмель, хромель, копель, ковар, платинит и феррико. Их поставляют в виде тонкой ленты, проволоки, поковок, листов, прутков и монокристаллов.

*Инвар* — это прецизионный железоникелевый сплав (36% никеля), имеющий малый коэффициент теплового расширения ( $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  при температуре от  $-80$  до  $100^\circ\text{C}$ ) благодаря тому, что магнитоэлектрическое уменьшение объема при нагреве компенсирует тепловое расширение. Магнитоэлектричество, открытая Джоулем еще в 1842 году, заключается в изменении формы и размеров тела при намагничивании, достигает наибольшей величины в ферромагнетиках и ферримангнетиках (железо, никель, кобальт), а в антиферромагнетиках, парамагнетиках и диамагнетиках магнитоэлектричество, наоборот, очень мала. Используется для изготовления геодезических проволок и лент, линеек, деталей измерительных и контрольных приборов. Температура плавления инвара —  $1430^\circ\text{C}$ , предел прочности —  $490 \text{ МН/м}^2$ . Инвар обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения, он практически не расширяется при температурах от  $-100$  до  $+100^\circ\text{C}$ .

*Элинвар* — это прецизионный сплав на железоникелевой основе (45% никеля), легированный хромом, молибденом и ванадием, упругие свойства которого мало зависят от температуры. Физическая природа аномалии упругих свойств элинвара — магнитная, поэтому выше Кюри точки аномалия пропадает. Элинвар применяют для изготовления часовых волосков, ультразвуковых линий задержек, резонаторов электромеханических фильтров, мембран, пружин и других деталей, от которых требуются упругие свойства, не зависящие от температуры.

*Манганин* — это прецизионный сплав на основе меди с добавкой марганца (от 11,5 до 13,5 %) и никеля (от 2,5 до 3,5 %) с чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области комнатных температур. Из манганина изготавливают эталонные сопротивления и элементы измерительных приборов, он используется в приборах высокого класса точности. Манганин чувствителен к значительному изменению влажности воздуха и неустойчив к коррозии в атмосфере.

*Константан* — это прецизионный медно-никелевый сплав (от 39 до 41% никеля, от 1 до 2% марганца, остальное — медь), характеризующийся слабой зависимостью электрического сопротивления от температуры. Удельное электрическое сопротивление константана при температуре  $20^\circ\text{C}$  намного превышает  $0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , температурный коэффициент электрического сопротивления после стабилизирующего отжига составляет около  $2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , температура плавления  $1260^\circ\text{C}$ . Применяется в электротехнике для изготовления реостатов, элементов измерительных приборов. Недостаток — большая термоэлектродвижущая сила (около  $39 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$ ). С медью или железом константан образует термопару, пригодную для измерения температур до  $500^\circ\text{C}$ .

*Перминвар* — это прецизионный сплав никеля (45%) с железом (30%) и кобальтом (25%) с добавками молибдена и хрома, характеризуется малой зависимостью магнитной проницаемости от напряженности поля. Относится к магнитно-мягким материалам. Точка Кюри —  $600^\circ\text{C}$ . Используются для изготовления высокостабильных сердечников трансформаторов и дросселей с минимальными искажениями преобразуемого сигнала.

*Пермендюр* — это прецизионный сплав железа (от 47 до 50 %) с кобальтом (от 48 до 50 %) и с небольшой добавкой ванадия (от 1,5 до 2 %), обладает свойством насыщения магнитной проницаемости при очень высоких значениях индукции магнитного поля (от 2 до  $2,4 \text{ Тл}$ ).

*Пермаллой* — это прецизионный сплав никеля (от 40 до 83 %) с железом (17%), обладающий магнитно-мягкими свойствами: высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис. Дополнительно легируется молибденом (4%), хромом, медью и кремнием. Точка Кюри —  $400^\circ\text{C}$ . Обычно поставляется в виде лент толщиной от  $0,003$  до  $0,5 \text{ мм}$ . Используется в радиотехнике, автоматике и вычислительной технике.

*Алюмель* — это прецизионный сплав (1,8—2,5 алюминия; 0,85—2,0 кремния; 1,8—2,2 марганца; остальное — никель и кобальт, причём кобальт присутствует как примесь в никеле, и для обеспечения требуемого значения термоЭДС его содержание должно быть в пределах от 0,6 до 1,0%. Легирование алюмеля цирконием (от 0,06 до 0,1%) и бором (от 0,005 до 0,03%) значительно увеличивает его пластичность при температуре от 600 до 1100 °С и длительную прочность при температуре от 700 до 900°С. Применяется в пирометрии в термопарах для измерений температуры до 1000°С.

*Хромель* — это прецизионный сплав никеля с хромом, обладающий благоприятным сочетанием термоэлектрических свойств и жаростойкости. Содержит около 10% Cr, около 1% Co, а также примеси (до 0,2% C и до 0,3% Fe). Характеризуется значительным изменением термоЭДС в широком интервале температур. ТермоЭДС термопары хромель – платина при температурах спаев 1000 и 0 °С — около 33 мВ. Имеет постоянное значение термоЭДС в интервале температур от 20 до 1000 °С. Изготавливается в виде проволоки и применяется в паре с алюмелем в качестве положительного термоэлектрода термопары хромель – алюмель, которая используется при измерении температуры. В России выпускают Хромель марок НХ9,5 и НХ9.

*Копель* — это прецизионный сплав меди, никеля (43%) и марганца (0,5%) Температура плавления копели около 1290 °С. Из всех медно никелевых сплавов копель обладает максимальной термоэлектродвижущей силой в паре с хромелем (около 6,95 мВ при 100°С, 49,0 мВ при 600°С). Применяется главным образом в пирометрии в качестве отрицательного термоэлектрода термопар при измерении температур до 600 °С. В России изготавливается копель марки МНМц 43 — 0,5.

*Ковар* — это прецизионный сплав на основе железа, содержит 18% Co и 29% Ni. Характеризуется низким коэффициентом теплового расширения от 4,5 до  $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  — в интервале от 20 до 400 °С, близким к коэффициенту теплового расширения стекла. Температура плавления ковара — 1450 °С. Удельное электрическое сопротивление 0,5мкОм·м, точка Кюри — 420 °С. Подвержен водяной коррозии и требует защитных покрытий. При впайке в стекло ковар образует прочное вакуумно-плотное сцепление, что используется в электровакуумной технике при изготовлении различных ламп.

*Платинит* — это прецизионный сплав в виде биметаллической проволоки, состоящей из железо-никелевого сердечника (58% железа, 42% никеля), покрытого тонким слоем меди (около 30% от общей массы проволоки). Коэффициент теплового расширения платинита близок к коэффициенту теплового расширения платины равному  $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , поэтому платинит заменяет платину в осветительных лампах и электровакуумных приборах.

*Фернико* — это прецизионный сплав железа, никеля (31%) и кобальта (15%), имеющий температурный коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту тугоплавкого стекла. Применяется в спаях со стеклом в узлах электровакуумных приборов, работающих при температурах ниже –80 °С. Коэффициент теплового расширения в интервале от 20 до 500 °С составляет  $6,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Кроме прецизионных сплавов прокатываются термобиметаллы, состоящие из двух или нескольких слоев металлов или сплавов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения. Согласно ГОСТу 10533-86 «Лента холоднокатаная из термобиметаллов. Технические условия» термобиметаллическую ленту изготавливают в рулонах, сварных рулонах или отрезках длиной от 500 до 1200 мм. Внутренний диаметр рулона — не менее 400 мм для ленты толщиной 0,80 мм и более, не менее 250 мм — для ленты толщиной от 0,41 до 0,80 мм и не менее 100 мм — для ленты толщиной 0,40 мм. Холоднокатаную ленту изготавливают шириной от 10 до 250 мм и толщиной от 0,1 до 2,0 мм из марок ТБ 148/79, ТБ 138/80, ТБ 129/79, ТБ 107/71, ТБ 103/70, ТБ 73/57, а также толщиной от 0,4 до 2,0 мм из марок ТБ 200/113, ТБ 160/122. Ленту в отрезках изготавливают толщиной от 0,1 до 2,5 мм включительно, шириной от 10 до 250 мм. Ленту шириной от 10 до 60 мм изготавливают с градацией 5 мм, шириной от 70 до 100 мм с градацией 10 мм, шириной более 100 мм — с градацией 20 мм.

Основное оборудование прокатного стана дуо-кварто 320 ХП, включающее рабочую клетку с ее электроприводом, предназначено для выполнения главной операции — деформации металла прокатываемой заготовки между двумя вращающимися рабочими валками (рис.1).

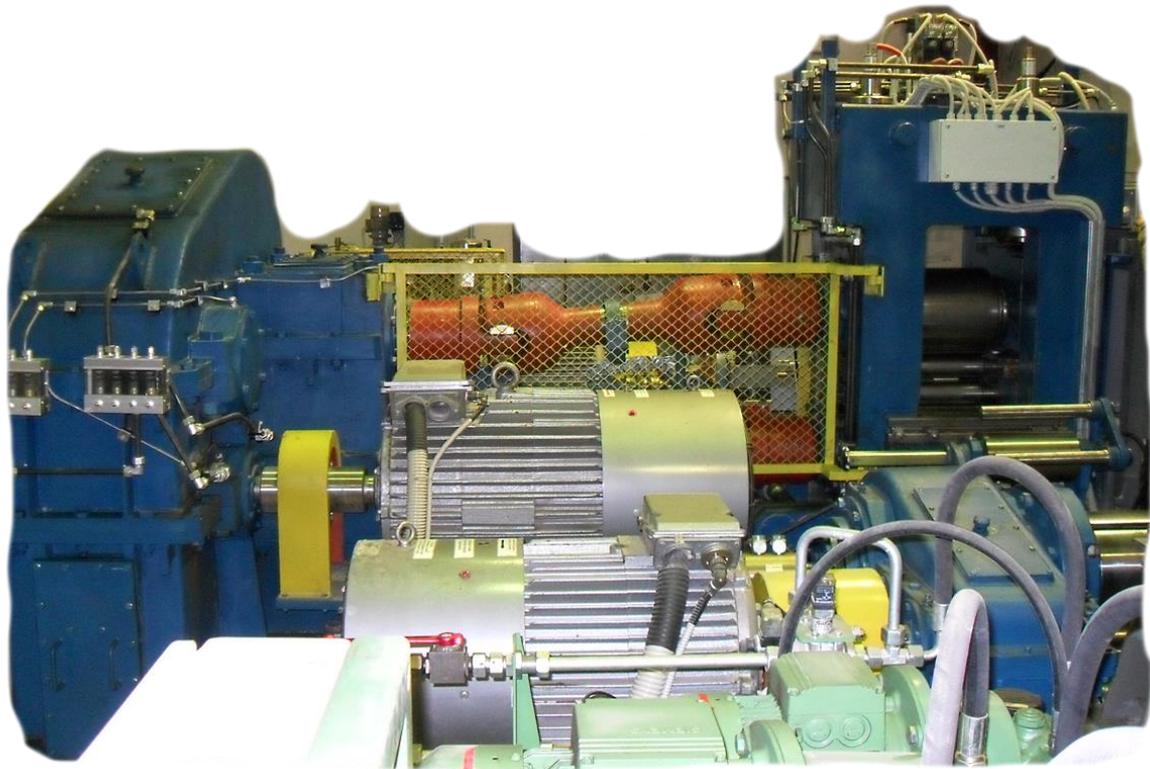


Рис. 1. Стан дуо-кварто 320 ХП

В состав рабочей клетки входят сменные кассеты рабочих валков дуо, сменные кассеты рабочих валков кварто; нажимные и уравнивающие устройства. Сюда же можно отнести правый и левый проводковые столы, а также правую и левую привалковую арматуру.

Электропривод рабочей клетки (главный электропривод) состоит из электродвигателя, моторной муфты, комбинированного 3-ступенчатого редуктора, включающего ступень шестеренной клетки с передаточным отношением, равным единице, верхнего и нижнего универсальных шпинделей.

Вспомогательное оборудование содержит рольганг, ножницы продольной и поперечной резки, сварочный аппарат, правильную машину, правую и левую моталки консольного типа со своими электроприводами.

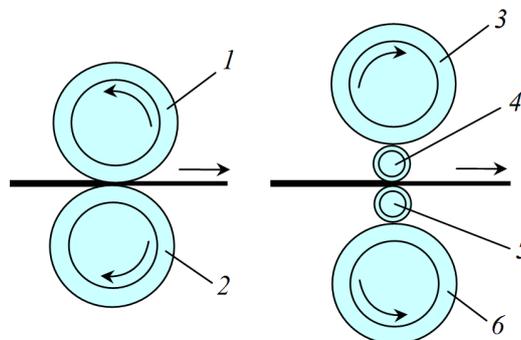


Рис. 2. Двухвалковая (слева) и четырехвалковая (справа) схемы прокатки ленты в рабочей клетке дуо-кварто 320:  
1, 2, 4, 5 — рабочие валки; 3, 6 — опорные валки

В процессе проведения экспериментов по прокатке сутунок на стане дуо-кварто 320 ХП, осуществляемой с большими обжатиями, после ударного захвата заготовки рабочими валками, на некотором участке или сразу нескольких участках валопровода могут возникнуть высокоамплитудные крутильные колебания. Если это произойдет, появляется опасность накопления усталостных повреждений в материале той или иной детали валопровода (вал шпинделя), что рано или поздно приведет к усталостному разрушению этой детали, скорее всего, в ее опасном сечении. Поэтому необходимы как теоретический расчет амплитуд и форм крутильных колебаний, так и экспериментальные исследования методом тензометрии.

Теоретический расчет выполнен на ЭВМ, для чего была построена математическая модель в среде MathCAD [3].

Дифференциальные уравнения движения крутильно-колеблющихся масс записаны 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;

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

Прокатный стан дуо-кварто 320 ХП имеет постоянно увеличивающиеся в процессе эксплуатации зазоры (люфты) в зубчатых передачах комбинированного редуктора, моторной муфте и шарнирах универсальных шпинделей. Эти зазоры частично раскрыты при холостом вращении рабочих валков и с ударом замыкаются после приложения технологической нагрузки, что заметно увеличивает динамику прокатного стана.

Для учета люфтов в упругих связях, дифференциальные уравнения движения (1) попарно вычитались друг из друга, в результате чего записана 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

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

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

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

Моменты сил упругости с учетом демпфирования и люфтов имеют вид

$$m_1 = \begin{cases} c_1(\psi_1 - \Delta_1) + \beta_1\psi_5 & , \quad \psi_1 > \Delta_1 \\ 0 & , \quad -\Delta_1 \leq \psi_1 \leq \Delta_1 \\ c_1(\psi_1 + \Delta_1) + \beta_1\psi_5 & , \quad \psi_1 < -\Delta_1 \end{cases} \quad m_2 = \begin{cases} c_2(\psi_2 - \Delta_2) + \beta_2\psi_6 & , \quad \psi_2 > \Delta_2 \\ 0 & , \quad -\Delta_2 \leq \psi_2 \leq \Delta_2 \\ c_2(\psi_2 + \Delta_2) + \beta_2\psi_6 & , \quad \psi_2 < -\Delta_2 \end{cases}$$

$$m_3 = \begin{cases} c_3(\psi_3 - \Delta_3) + \beta_3\psi_7 & , \quad \psi_3 > \Delta_3 \\ 0 & , \quad -\Delta_3 \leq \psi_3 \leq \Delta_3 \\ c_3(\psi_3 + \Delta_3) + \beta_3\psi_7 & , \quad \psi_3 < -\Delta_3 \end{cases} \quad m_4 = \begin{cases} c_4(\psi_4 - \Delta_4) + \beta_4\psi_8 & , \quad \psi_4 > \Delta_4 \\ 0 & , \quad -\Delta_4 \leq \psi_4 \leq \Delta_4 \\ c_4(\psi_4 + \Delta_4) + \beta_4\psi_8 & , \quad \psi_4 < -\Delta_4 \end{cases}$$

Решение уравнений движения (3) найдено благодаря встроенной функции Rkadapt реализующей классический приближенный численный метод Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом интегрирования. В результате были построены графики моментов сил упругости на участках валопровода, где расположены универсальные шпиндели (рис 3).

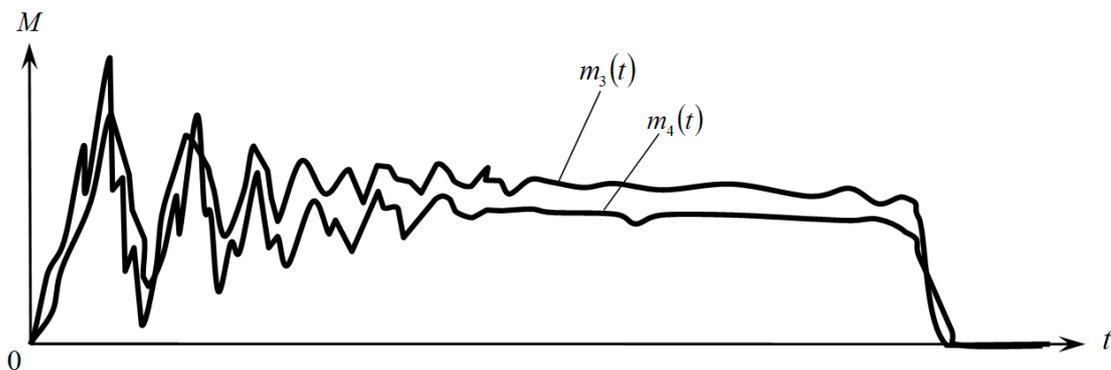


Рис. 3. Графики моментов сил упругости

Таким образом, для валопровода электропривода стана дуо-кварто 320 ХП выполнены все основные этапы динамического расчета: составлена 5-массовая разветвленная расчетная схема, определены ее инерционные, упругие и другие параметры; записаны и решены дифференциальные уравнения движения масс, с учетом внешних нагрузок, приложенных со стороны электродвигателя и рабочих валков; построены графики моментов сил упругости.

Для эксплуатационной диагностики крутильных колебаний, возникающих на разветвленном участке валопровода стана дуо-кварто 320 ХП, где расположены его универсальные шпиндели, оказалась вполне пригодной тензометрическая аппаратура (тензоаппаратура) контроля энергосиловых параметров (сил и моментов прокатки), давно установленная на стане дуо-160 в лаборатории кафедры МТ10 (МГТУ имени Н.Э. Баумана). Два канала этой аппаратуры настроены на косвенное измерение крутящих моментов: первый канал — на валу верхнего шпинделя, второй — на валу нижнего.

До появления персонального компьютера тензоаппаратура контроля моментов прокатки состояла из двух тензорезисторных полумостов (тензополумостов), токосъемных колец (токосъемников), тензометрического усилителя (тензоусилителя) ТА-5 и шлейфового светолучевого осциллографа Н-700 для записи аналогового сигнала в виде осциллограммы на специальную светочувствительную фотобумагу УФ-67. После приобретения стационарного персонального компьютера 4-канальный усилитель ТА-5 заменили 6-канальным измерительным блоком Ш74/1, а осциллограф Н-700 изъяли из состава тензоаппаратуры. К первому каналу измерительного блока Ш74/1 подключили через токосъемник тензомост, спаянный из четырех тензорезисторов, наклеенных на вал верхнего шпинделя, а ко второму каналу — тензомост, спаянный из тензорезисторов, наклеенных на вал нижнего шпинделя.

Долгое время предпринимались попытки использовать в качестве АЦП обычную компьютерную звуковую карту, у которой имеются линейный и микрофонный аналоговые входы. Звуковая карта способна воспринимать и преобразовывать в цифровую форму аналоговый сигнал напряжением до 2В и частотой до 20 кГц. Существует ряд небольших и удобных программ, таких как программа Oscilloscope 2.51 для Windows, которые легко превращают персональный компьютер в виртуальный осциллограф, анализатор спектра и регистратор данных. Звуковая карта не является полноценным АЦП и не предназначена для тензометрической аппаратуры. Кроме того, звуковую карту можно случайно вывести из строя, если по неосторожности подать на ее аналоговый вход сигнал напряжением выше 2В. Поэтому для безопасного подключения двух выводов измерительной диагонали тензомоста к звуковой карте (к моменту защиты дипломного проекта) планируем самостоятельно изготовить несложный делитель напряжения с потенциометром и стабилитронами [4].

## Литература

1. Колесников А.Г. Технологическое оборудование прокатного производства: учебное пособие / А.Г. Колесников, Р.А. Яковлев, А.А. Мальцев. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 158 с.
2. Стан дуо-кварто 320 холодной прокатки. Руководство по эксплуатации 1399100 РЭ.
3. Мальцев А.А. Исследование динамики и прогнозирование долговечности привода прокатного стана: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 35 с.
4. Зубаль И. Компьютер в роли осциллографа, спектроанализатора, частотомера и генератора // Технический портал радиолюбителей России. [http://www.cqham.ru/scope\\_07.htm](http://www.cqham.ru/scope_07.htm).