

УДК 621.0

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ
ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗАНИИ

Губанова А.А., Мартыненко А.И.

Донской государственный технический университет

Ростов-на-Дону, Россия

MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION OF DEFORMATIONS OF THE TOOL
WHEN CUTTING

Gubanova A.A., Martinenko A.I.

Don State Technical University

Rostov-on-Don, Russia

Целью работы является рассмотрение вопроса моделирования системы управления двигателями продольной и поперечной подачи металлорежущего станка. В ходе работы была разработана математическая модель системы, приведены расчеты основных параметров системы. Вследствие чего была построена модель адаптивной системы в Simulink. По результатам моделирования можно сказать, что полученная система устойчива и позволяет компенсировать происходящие при резании деформации резца, что приведет к более точной обработке деталей. Приведены графики при различных моментах нагрузки, в том числе, и со случайно изменяющимся, показаны результаты при введении обратной связи и без нее. Моделирование показало, что есть возможность построения адаптивной системы с коррекцией деформаций подсистемы инструмента.

Ключевые слова: математическая модель, поперечная и продольная подачи, силы резания, деформация инструмента, момент нагрузки

The aim of the paper is to consider the modeling of the control system for longitudinal and transverse feeders of a metal-cutting machine. In the course of the work, a mathematical model of the system was developed, calculations of the main parameters of the system are given. As a result, the model of the adaptive system was built in Simulink. Based on the results of the simulation, it can be said that the resulting system is stable and allows to compensate for the deformation of the tool that occurs during cutting, which will lead to more precise machining of the parts. Graphs are presented for various load moments, including randomly changing ones, and the results are shown with and without feedback. Simulation showed that it is possible to build an adaptive system with correction of the deformations of the tool subsystem.

Keywords: mathematical model, transverse and longitudinal feed, cutting forces, tool deformation, load moment

При резании на режущий инструмент действует пространственная система сил. Режущий инструмент находится в контакте с обрабатываемым материалом по трем рабочим поверхностям его режущей части: по передней, главной задней и вспомогательной задней поверхности. Поскольку эти поверхности инструмента расположены под разными углами друг к другу, то и действующие на этих поверхностях нормальные и касательные силы в пространстве располагаются не параллельно друг к другу. Это силы нормального давления и касательные силы трения. Равнодействующая всех сил при несвободном резании раскладывается на три взаимно перпендикулярных направления X, Y , и Z .

Расчет величины составляющих силы резания для практических целей ведется по эмпирическим формулам с использованием данных справочной литературы.

Расчет составляющих силы резания: осевой составляющей P_x , радиальной P_y и главной составляющей силы резания P_z производится по эмпирической формуле [1]:

$$P = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p \quad (1)$$

где:

t – глубина резания;

s – подача резания;

v – скорость резания;

$K_p = K_{mp} \cdot K_{fp} \cdot K_{rp} \cdot K_{lp} \cdot K_{rp}$ – поправочный коэффициент, представляющий собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания;

C_p – константа, зависящая от свойств обрабатываемого материала, по сути своей представляющая удельную силу резания, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения среза, H/mm^2 ;

x, y, n – поправочные коэффициенты в зависимости от физико-математических свойств материала.

Силы P_x, P_y образуются от совместного воздействия привода поперечной и продольной передач. Таким образом, модель системы будет состоять из двух систем управления двигателями: системы управления привода продольной подачи X и системы управления привода поперечной подачи Y .

При моделировании системы сделаем некоторые допущения.

Первое допущение. Произведем замену модели асинхронного двигателя, моделью двигателя постоянного тока. Это допущение возможно в меру того, что нашей целью ставится

про моделировать процесс коррекции деформации инструмента и поэтому управление двигателями можно упростить.

Модель двигателя опишем следующим уравнением:

- модель привода продольной подачи:

$$\begin{cases} U - i \cdot R - C_e \cdot \omega - L \cdot \frac{di}{dt} = 0, \\ C_m \cdot i - J \cdot \frac{d\omega}{dt} - M = 0; \end{cases} \quad (2)$$

- модель привода поперечной подачи:

$$\begin{cases} U = i \cdot R + C_e \cdot \omega + L \cdot \frac{di}{dt}, \\ C_m \cdot i - M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

По полученному уравнению передаточной функции построим схему модели в Simulink (рисунок 1):

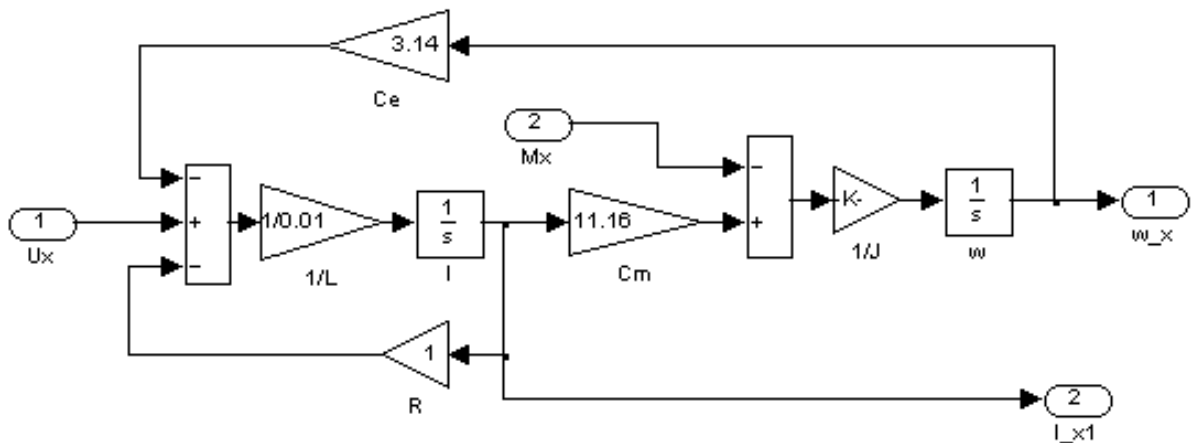


Рисунок 1 – Модель двигателя

Второе допущение. Независимость работы продольной и поперечной подач друг от друга. Таким образом, компенсация происходит для каждой из подач отдельно и стремится установить заданной значение для продольной подачи X, для поперечной подачи – Y.

Учтем, что колебание инструмента зависит от жесткости его закрепления.

Жесткость системы можно представить в виде колебательного звена:

$$W(p) = \frac{K}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где:

$\xi=0.2$ - коэффициент демпфирования;

$T=0.5\text{мс}$ - постоянная времени.

Изменение координаты Δx рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \frac{F}{C} \quad (4)$$

$$W(p) = \frac{0.00001}{(5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}$$

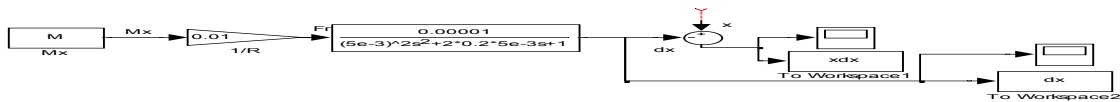


Рисунок 2 – Модель закрепленного инструмента в суппорте

Для получения значений моментов для каждой подачи рассчитаем, зная значения силы и расстояния действия этой силы $d=100\text{мм}$.

$$M = P \cdot d \quad (5)$$

где:

P – сила действующая на заготовку;

d – диаметр заготовки.

Найдем составляющие силы резания продольную P_x и поперечную P_y :

$$P_x = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (6)$$

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (7)$$

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{r p}, \quad (8)$$

Сначала рассчитаем продольную силу резания P_x . Из таблиц, для режима резания точение находим значения коэффициентов[2]:

$C_p=67$;

$t=1\text{мм}$;

$s=0.23\text{об/мин}$;

$x=1.2$;

$y=0.65$;

$n=0$;

$K_{\varphi p} = 1.27$ – главный угол в плане $\varphi=60^\circ$, для материала режущей части инструмента быстрорежущей стали;

$K_{\gamma p} = 1.7$ – передний угол $\gamma=12^\circ-15^\circ$, - для быстрорежущей стали;

$K_{\lambda p} = 1$ – угол наклона главного лезвия $\lambda=0^\circ$, - для твердого сплава;

$K_{r p} = 1$ – радиус при вершине $r=1\text{мм}$, для быстрорежущей стали;

$K_{mv} = 0.48$ – коэффициент учитывающий влияние физико-механических свойств

жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов на скорость резания.

Подставим найденные коэффициенты в (6):

$$P_x = 10 \cdot 67 \cdot 1^{1.2} \cdot 0.23^{0.65} \cdot v^0 \cdot (1.27 \cdot 1.7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.48) = 267 \text{ Н} .$$

Теперь рассчитаем значение момента нагрузки по (5):

$$M_x = 267 \cdot 100 = 26700 = 26.7 \text{ Нм}$$

Далее произведем расчет поперечной составляющей силы резания P_y .

Из таблиц, для режима резания точение находим значения коэффициентов[2]:

$C_p=125$;

$t=1\text{мм}$;

$s=0.23\text{об/мин}$;

$x=0.9$;

$y=0.75$;

$n=0$;

$K_{\phi p} = 0.71$ – главный угол в плане $\phi=60^\circ$, для материала режущей части инструмента быстрорежущей стали;

$K_{\gamma p} = 1.6$ – передний угол $\gamma=12^\circ-15^\circ$, - для быстрорежущей стали;

$K_{\lambda p} = 1$ – угол наклона главного лезвия $\lambda=0^\circ$, - для твердого сплава;

$K_{r p} = 0.82$ – радиус при вершине $r=1\text{мм}$, для быстрорежущей стали;

$K_{mv} = 0.48$ – коэффициент учитывающий влияние физико-механических свойств

жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов на скорость резания.

Подставим найденные коэффициенты в (7):

$$P_y = 10 \cdot 125 \cdot 1^{0.9} \cdot 0.23^{0.75} \cdot v^0 \cdot (0.71 \cdot 1.6 \cdot 1 \cdot 0.82 \cdot 0.48) = 186 \text{ Н}$$

Теперь рассчитаем значение момента нагрузки по (5):

$$M_y = 186 \cdot 100 = 18600 = 18.6 \text{ Нм}$$

Результаты при моделировании продольной подачи представлены на рисунке 3.

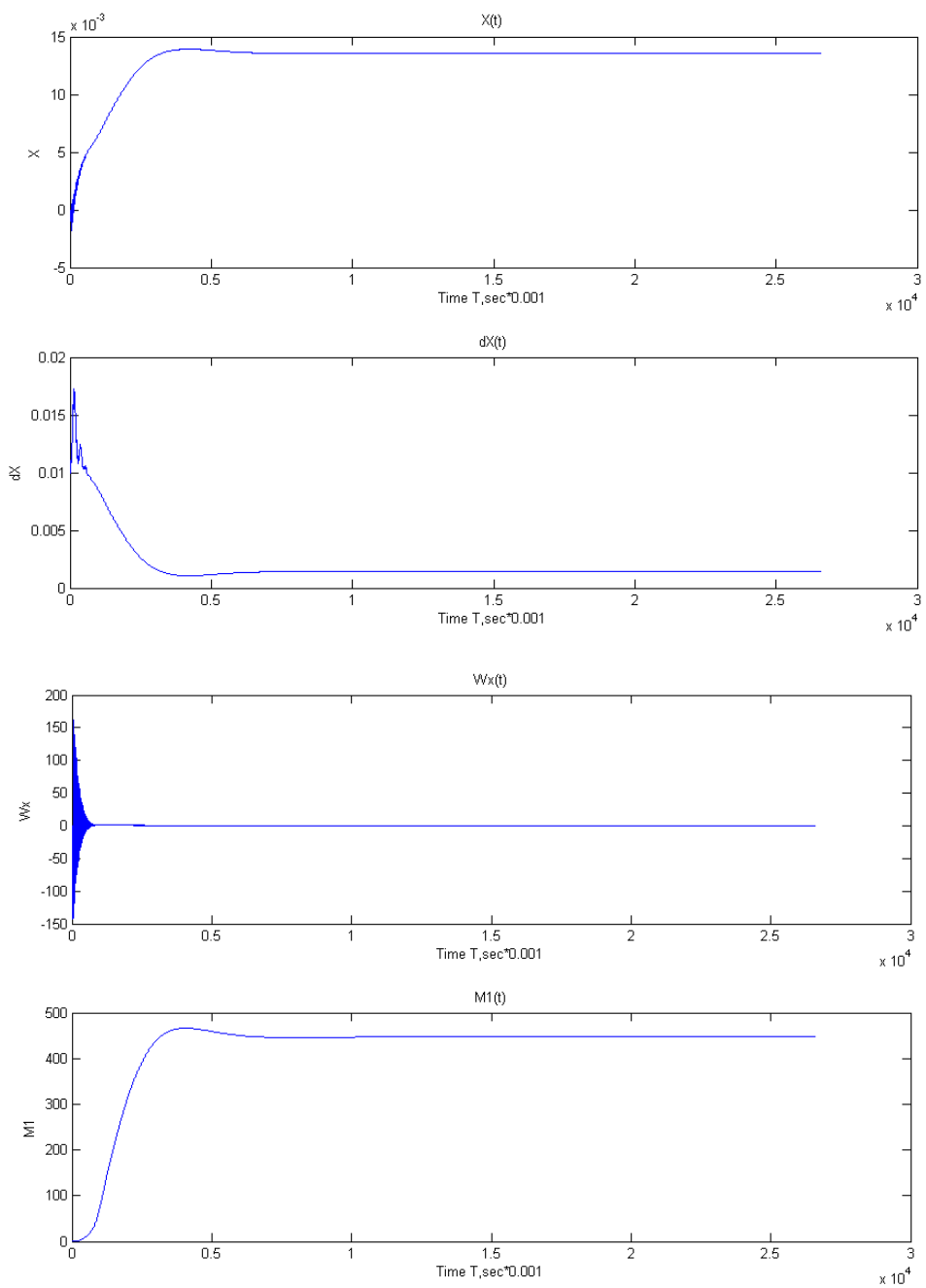


Рисунок 3 – Результат моделирования перемещения резца продольной подачей с обратной связью с моментом нагрузки при глубине резания 2мм.

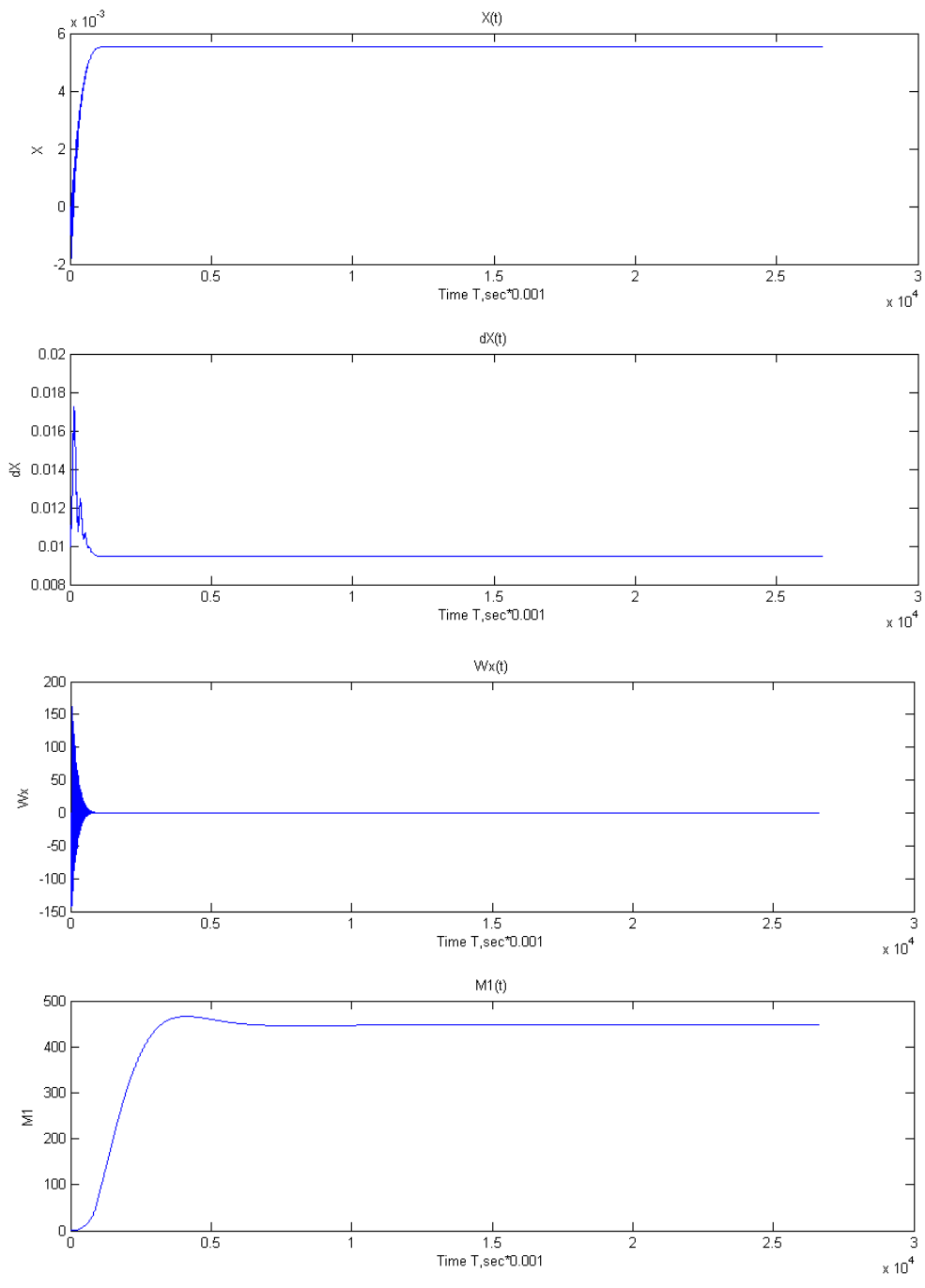


Рисунок 4– Результат моделирования перемещения резца продольной подачей без обратной связи с моментом нагрузки при глубине резания 2мм.

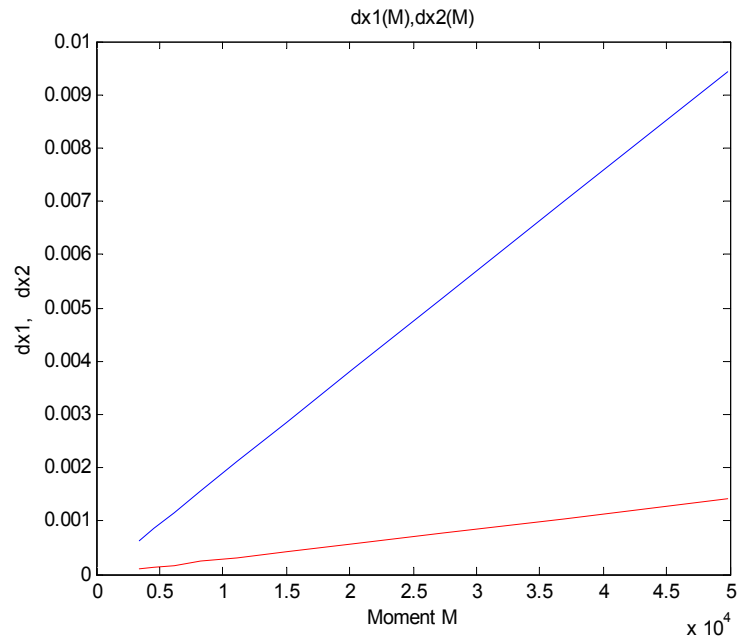
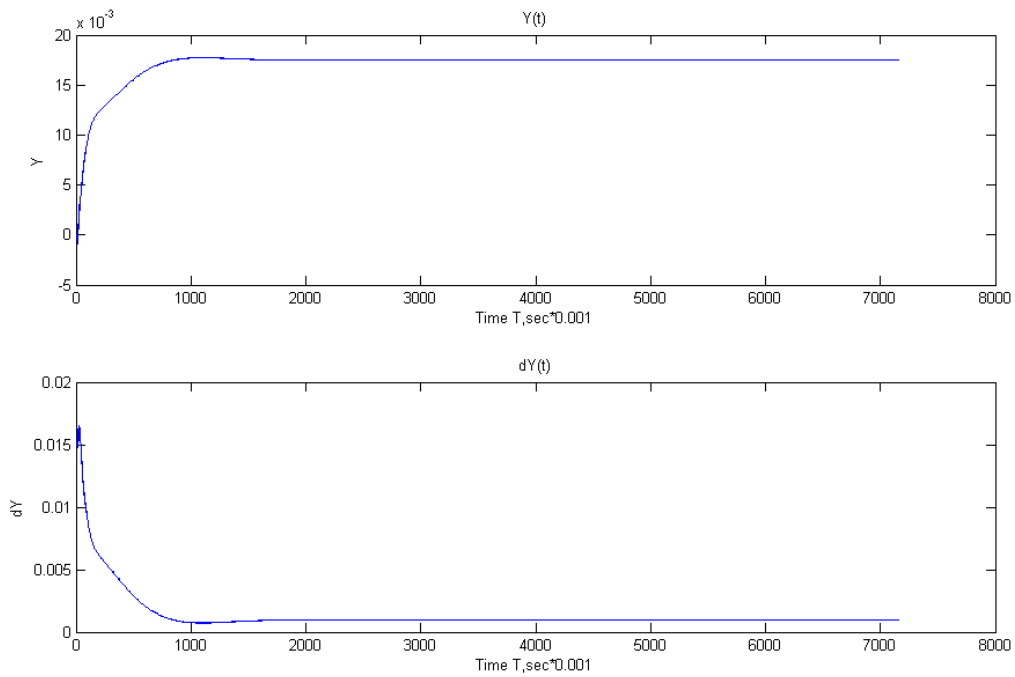


Рисунок 5 – Зависимость величины ошибки от момента для продольной подачи, нижний график с ОС, верхний график без ОС

Результаты при моделировании поперечной подачи



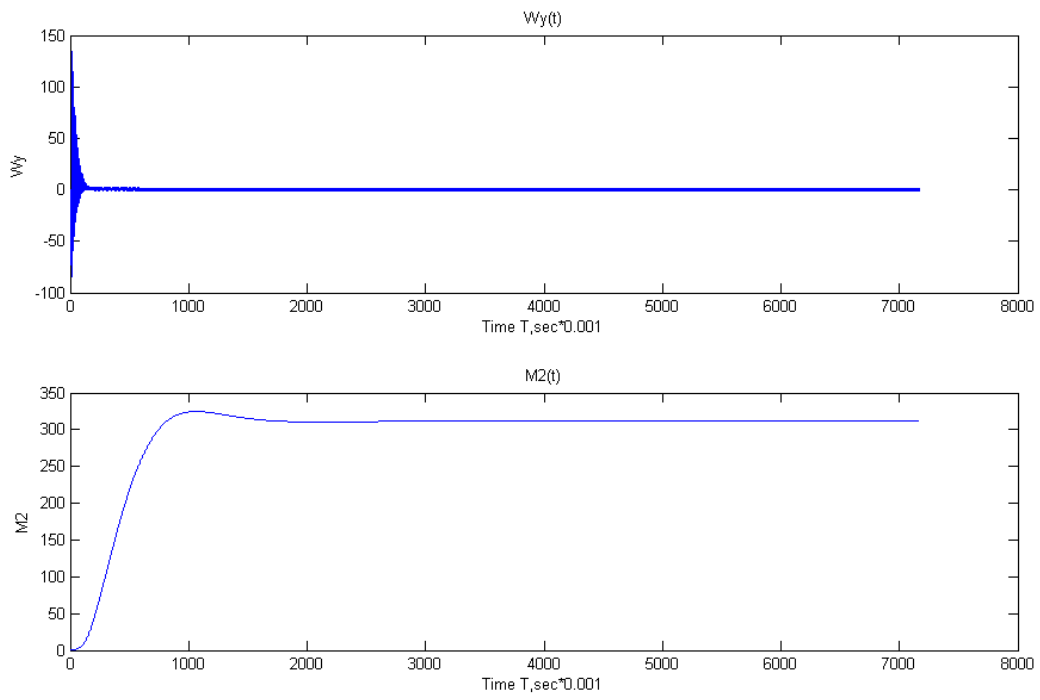
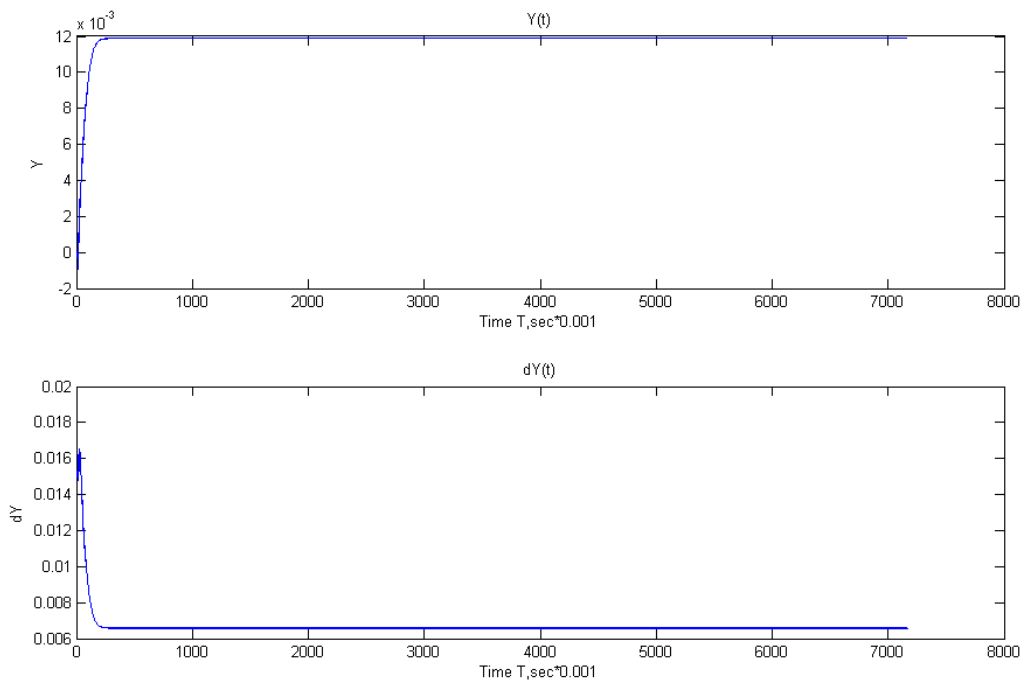


Рисунок 6 – Результат моделирования перемещения резца поперечной подачи с обратной связью с моментом нагрузки при глубине резания 2мм.



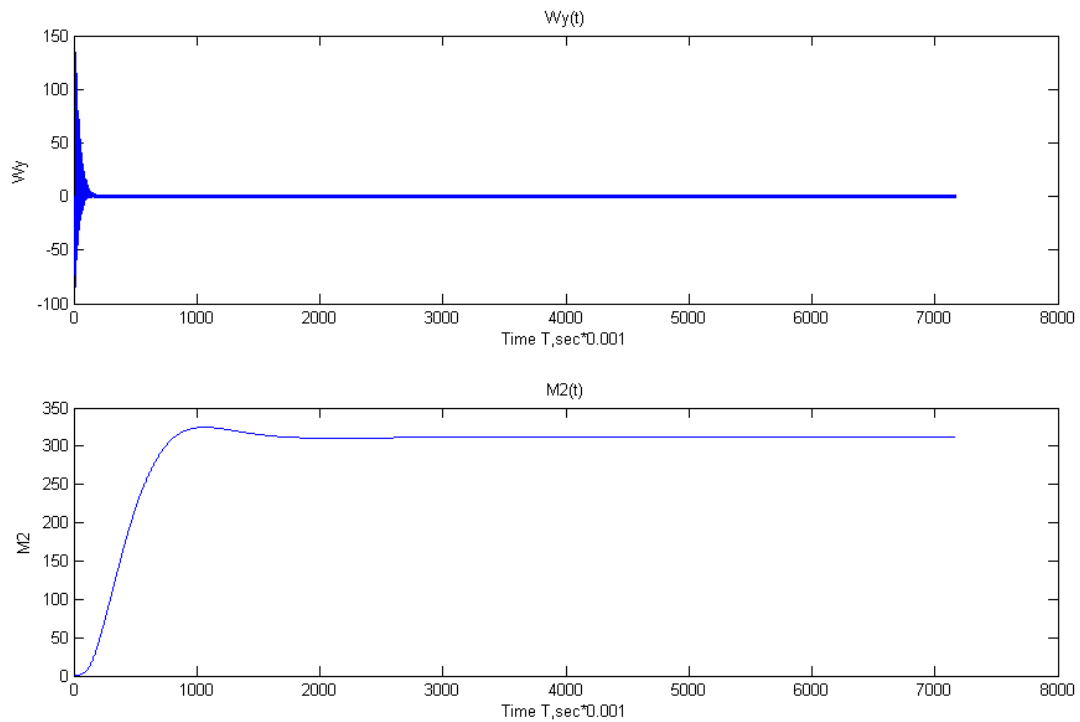


Рисунок 7 – результат моделирования перемещения резца поперечной подачи без обратной связи с моментом нагрузки при глубине резания 2мм.

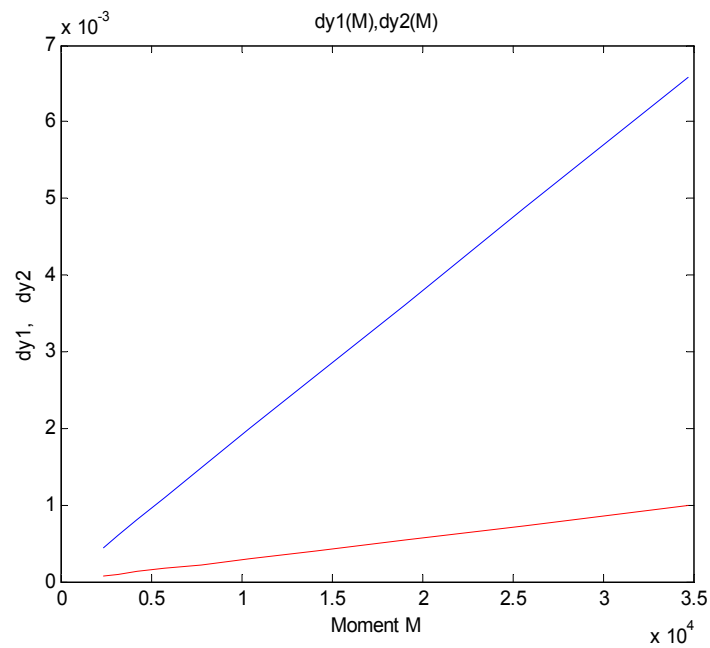


Рисунок 8 – Зависимость величины ошибки от момента для поперечной подачи, нижний график с ОС, верхний график без ОС

Получив при моделировании графики, отображающие процессы изменения координаты $X(T)$ и $Y(T)$, ошибки координаты $dX(T)$ и $dY(T)$, изменение скорости и моментов $W_x(T)$, $W_y(T)$, $M_1(T)$ и $M_2(T)$, проведем анализ полученных результатов.

Моделирование проводилось по каждой координате при глубине резания $t = 2 \text{ мм}$. Результат моделирования можно наблюдать при включении или отключении обратной связи, которая компенсирует изменение координаты режущего инструмента. Работу данной обратной связи можно увидеть, сравнив графики на рисунке 3 и рисунке 4. На рисунке 3 показаны графики после расчета модели с обратной связью, при этом значение координаты $X=0.013 \text{ мм}$, при этом значение ошибки равно $dX=0.002 \text{ мм}$ – ошибка мала по сравнению с координатой. После удаления обратной связи модель показывает следующие графики рисунок 4. Из графиков видно, что произошло увеличение ошибки координаты $dX=0.0095$, и изменилось значение самой координаты $X=0.006 \text{ мм}$. Значения моментов, показанные на графиках соответствуют значениям моментов для соответствующих режимов резания.

Аналогичная ситуация просматривается и при моделировании поперечной подачи. Результаты моделирования представлены на графиках рисунки 6,7. Из графиков видно, что при добавлении обратной связи происходит уменьшение ошибки перемещения резца.

На графиках (рисунки 5,8) приведены результаты моделирования при воздействии случайно-изменяющегося момента нагрузки. Из графиков видно, что обратная связь компенсирует ошибку, что и приводит к подстройке системы под заданные параметры. Таким образом, моделирование показало, что есть возможность построения адаптивной системы с коррекцией деформаций подсистемы инструмента.

Список литературы

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. С. 229 - 234.
2. Бармин Б.М. Вибрации и режимы резания. М.: Машиностроение, 1972, -71 с.
3. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Бабенко Т.С. Свойства стационарных траекторий деформационных смещений инструмента при фрезеровании концевыми фрезами. Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении-2016: сб.науч.тр./Научно-производственный кооператив «ОНИКС». Ирбит:НПК «ОНИКС», 2016. С.144-155.
4. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Губанова А.А. Определение оптимальных траекторий при обработке с учётом эволюции процесса резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2014. Т. 14. № 3 (78). С. 5-12.