

УДК 534

АНАЛИЗ ВИБРАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

© Артем Игоревич Ермолаев^{1,2}, Владимир Иванович Ерофеев¹,
Александр Сергеевич Плехов²

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

acidwolfvx@rambler.ru, erof.vi@yandex.ru, aplehov@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния сил резания и контактного взаимодействия фрезы с материалом на генерацию вибровозмущений, влияющих на точность обработки и на ресурс станка. Рассмотрен процесс резания металла прямозубой фрезой, как наиболее обций и возбуждающий наиболее сильные периодические изменения сил в зоне резания. Авторами разработана математическая модель динамических процессов в системе «деталь-фреза» с учетом упруго-вязких связей. В работе специфицирована имитационная модель для исследования динамических процессов в зоне резания, получены и проанализированы результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: фрезерование, динамические процессы резания, относительное запаздывание процессов, силы резания и контактных взаимодействий, вибровозмущения, имитационное моделирование.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 г.г. по теме № 0035-2014-0402, № госрегистрации 01201458047 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-48-520010-р_а).

ANALYSIS OF VIBRATIONS ARISING IN THE MILLING PROCESS

© A.I.Ermolaev^{1,2}, V.I. Erofeev¹, A.S. Plekhov²

¹Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

acidwolfvx@rambler.ru, erof.vi@yandex.ru, aplehov@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of cutting forces and the contact interaction of the cutter with the material on the generation of vibration perturbations that affect the machining accuracy and the life of the machine. The process of metal cutting with a spur mill is considered as the most common and exciting the most powerful periodic changes in the forces in the cutting zone. The authors have developed a mathematical model of dynamic processes in the "part-mill" system, taking into account elastic-viscous bonds. In the work, a simulation model for

the study of dynamic processes in the cutting zone is specified, the results of computer simulation are obtained and analyzed.

Keywords: *milling, dynamic cutting processes, relative delay of processes, cutting forces and contact interactions, vibration perturbations, simulation modeling, gradient-elastic half-space, moving source, surface wave.*

Acknowledgements. *The work was carried out within the Russian state task for conducting fundamental scientific research for 2013-2020 on the topic No. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and the work was supported by RFBR (project 18-48-520010).*

Введение. Совершенствование технологии высокоскоростного фрезерования с целью повышения производительности и качества обработанной поверхности, повышения точности позиционирования узлов станка при незначительном увеличении себестоимости готовых деталей становится главным направлением развития машиностроения, что особенно востребовано в таких областях промышленности, как авиастроение, автомобилестроение, производство космических аппаратов и т.п. [1,2]

Полное и подробное исследование силовых воздействий, возникающих при фрезеровании, существенно осложнено геометрическими особенностями фрез. По сравнению с динамикой процесса точения фрезерование отличается переменным припуском, наличием нескольких режущих кромок, повышенными требованиями к жесткости конструкции. В ряде работ [3-5] описаны динамические процессы при фрезеровании с учетом сил контактного взаимодействия задней поверхностями зубьев фрезы с обработанной поверхностью детали. В работе В.А. Кудинова [6] динамические процессы фрезерования рассматриваются как взаимодействие упругой системы станка и процесса резания. Параметры этого процесса, такие как толщина срезаемого слоя, неровности от прохода предыдущего зуба фрезы периодически изменяются. Такое изменение рассматривается как внешнее воздействие на систему.

В работах [11,12] рассматриваются системы резания с одной степенью свободы, в которых возникают вибрационные процессы. В работе [11] рассмотрен случай, когда колебания в замкнутом контуре «деталь – резец – приспособление – станина станка» возникают при запаздывании силы резания относительно момента изменения глубины срезаемого слоя, а также из-за периодического контактного взаимодействия между обработанной поверхностью и задней поверхностью резца. В работе [12] в качестве механизма возникновения автоколебаний принято взаимодействие силы контактного взаимодействия между стружкой и режущим инструментом при потере контакта между резцом и деталью.

Математическая модель процесса фрезерования. В процессе резания фреза совершает относительные формообразующие движения, состоящие из вращательного движения фрезы, совершаемого приводом главного движения и характеризующегося частотой вращения шпинделя ω (рад/сек) или n (об/мин), и поступательного движения, как правило, стола. Физическая модель процесса фрезерования с двумя степенями свободы приведена на рис. 1.

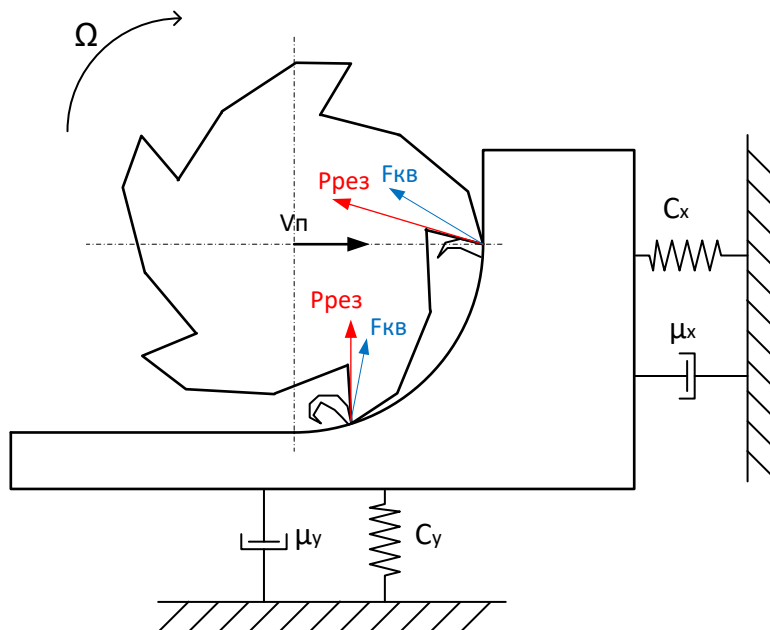


Рис.1. Физическая модель процесса фрезерования с двумя степенями свободы.

Простейшая модель кинематики процесса фрезерования при направлении подачи, совпадающем с осью X , может быть описана выражением [7]:

$$\begin{cases} x_k(t) = V_x \cdot t + R \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_k) \\ y_k(t) = R \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_k) \end{cases}, \quad (1)$$

где V_x – скорость подачи фрезы или стола, R – внешний радиус фрезы, φ_k – угол начального положения k -го зуба фрезы.

Выражение учитывает лишь кинематику фрезы, ввиду чего большинство параметров процесса резания принимаются постоянными. К числу таковых следует отнести, например, отсутствие следов обработки после прохода предыдущего зуба и скорость резания, связанную с параметром «подачи на зуб» t_0 выражением:

$$V_x = z \cdot n \cdot t_0, \quad (2)$$

где z – число зубьев фрезы, n – число оборотов фрезы в единицу времени.

Величина t_0 определяет максимальное значение заданной толщины срезаемого слоя, которое является стационарным значением, определяемым скоростью подачи заготовки/фрезы.

Сила резания при фрезеровании в системе с одной степенью свободы относительно действительного значения толщины срезаемого слоя $X(t)$ может быть представлена следующим выражением [11, 17]:

$$P(t) = c \cdot X(t), \quad (3)$$

где c – жесткость резания, $X(t)$ – толщина срезаемого слоя.

Жесткость резания в формуле характеризует жесткость соединения «деталь-резец» [6, 13]. Эта величина представляет собой коэффициент пропорциональности между силой резания и глубиной резания и имеет размерность коэффициента жесткости.

Явление запаздывания силы резания по отношению к изменению глубины резания было известно давно и описано в работах В.А. Кудинова и И. Тлустого [6, 16]. При резком

углублении резца в заготовку в радиальном направлении сила резания нарастает по аperiodическому закону. Деформация, определяющая изменение силы резания, с учетом ее запаздывания относительно момента изменения глубины резания $X(t)$ может быть описана выражением [17]:

$$\dot{U}(t) \cdot T_1 + U(t) = X(t), \quad (4)$$

где $U(t)$ – деформация, определяющая изменение силы резания с учетом ее запаздывания с постоянной времени T_1 относительно периодически меняющегося значения толщины срезаемого слоя.

Уравнение (4) отличается от приведенного в работе [17] выражения, где в правой части выражения находится разница между заданной и действительной величинами срезаемого слоя. Если в том случае явление запаздывания силы резания вызывало автоколебания в системе резания, исследуемые в работе [17], то в данном случае учет данного явления необходим для уточнения математической модели процесса фрезерования. Подставляя (4) в (3), получим уравнение динамики силы резания с учетом ее запаздывания относительно переменной толщины срезаемого слоя:

$$P(t) = c \cdot U(t). \quad (5)$$

Наличие зависимости силы контактного взаимодействия от глубины резания $X(t)$ в выражении (6) физически подтверждается в экспериментальных исследованиях, приведенных в работе [15].

Сила контактного взаимодействия между обработанной поверхностью детали и задней поверхностью резца выражается следующим образом [17]:

$$F(t) = P_0 \cdot e^{-\frac{X(t)}{T_2}}, \quad (6)$$

где P_0 – коэффициент, характеризующий сопротивление перемещению резца в деталь [14], T_2 – постоянная времени изменения силы контактного взаимодействия в зависимости от изменения толщины срезаемого слоя.

Для физической модели, приведенной на рисунке 1, запишем систему уравнений на основании уравнения Лагранжа II-го рода для осциллятора, подверженного вынужденным колебаниям, а также выражений (1), (4) – (6). При этом процесс резания принимаем установившимся и равномерным.

$$\begin{cases} \Sigma F_x(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + \mu_x \cdot \dot{x}(t) + C_x \cdot x(t) = U(t) \cdot c \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_{rez}) + P_0 \cdot e^{-\frac{X(t)}{T_2}} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_{skv}), \\ \Sigma F_y(t) = m \cdot \ddot{y}(t) + \mu_y \cdot \dot{y}(t) + C_y \cdot y(t) = U(t) \cdot c \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{rez}) + P_0 \cdot e^{-\frac{X(t)}{T_2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{skv}) \end{cases}, \quad (7)$$

где m – приведенная масса системы «фреза - деталь», μ_x и μ_y – коэффициенты демпфирования относительно координатных осей X и Y, C_x и C_y – коэффициенты жесткости относительно координатных осей X и Y, φ_{rez} и φ_{skv} – углы, которые составляют с касательной плоскостью к обрабатываемой поверхности сила резания и сила контактного взаимодействия соответственно.

В системе (7) сумма сил резания и контактного взаимодействия рассчитывается для каждого зуба в отдельности. Выражения в правой части умножены на периодическую функцию с частотой вращения фрезы, что позволяет учесть переменность припуска при фрезеровании.

Система (7) не учитывает некоторые имеющие место при фрезеровании явления. Во-первых, в любой момент времени часть зубьев фрезы не участвует в процессе резания, что можно

учесть, добавив в правую часть уравнений системы (7) оконную функцию $g(\omega \cdot t + \varphi_k)$, задав в ней угол входа k -го зуба контакт с заготовкой и угол выхода из нее:

$$g(\omega \cdot t + \varphi_k) = \begin{cases} 1 & | \varphi_{start} \leq \omega \cdot t + \varphi_k \leq \varphi_{exit} \\ 0 & | \omega \cdot t + \varphi_k \leq \varphi_{start}; \omega \cdot t + \varphi_k \geq \varphi_{exit} \end{cases}, \quad (8)$$

где φ_{start} – угол поворота фрезы, при котором происходит врезание зуба в деталь, φ_{exit} – угол поворота фрезы, при котором происходит выход зуба из детали.

Во-вторых, в уравнениях динамики необходимо учесть начальную фазу k -го зуба фрезы. Наконец, суммарная сила резания может быть найдена путем сложения полученных выражений для каждого зуба по каждой из координатных осей. Полагаем, что фреза не имеет дефектов, державка не деформируется при резании, обрабатываемая деталь имеет правильную форму, а процесс резания является установившимся.

Суммарная сила, возникающая в зоне резания и действующая на фрезу, может быть определена следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_X(t) = \sum_{k=1}^z U_k(t) \cdot c \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_{rez} + \varphi_k) \cdot g(\omega \cdot t + \varphi_k) + \\ + \sum_{k=1}^z P_0 \cdot e^{-\frac{X_k(t)}{T_2}} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_{skv} + \varphi_k) \cdot g(\omega \cdot t + \varphi_k), \\ \Sigma F_Y(t) = \sum_{k=1}^z U_k(t) \cdot c \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{rez} + \varphi_k) \cdot g(\omega \cdot t + \varphi_k) + \\ + \sum_{k=1}^z P_0 \cdot e^{-\frac{X_k(t)}{T_2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{skv} + \varphi_k) \cdot g(\omega \cdot t + \varphi_k). \end{array} \right. \quad (9)$$

Приравняв суммарные силы ΣF_X и ΣF_Y к левой части системы (7), учитывающей упругие и диссипативные процессы, получим иное описание динамики упругой системы резания:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x & 0 \\ 0 & C_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = F_{rez}, \quad (10)$$

где F_{rez} – матрица суммарных сил, возникающих в процессе фрезерования.

Имитационное моделирование системы «зуб – деталь». Для исследования динамических процессов при фрезеровании и верификации полученной математической модели (9) следует воспользоваться имитационным моделированием. Данный способ исследования позволяет использовать имеющиеся математические модели как полностью, так и частично, позволяет с высокой точностью и скоростью строить зависимости и выполнять математические вычисления, отличается сравнительной простотой и наглядностью.

Имитационная модель построена в среде программирования Simulink программного пакета Matlab и представляет собой систему взаимодействующих блоков, выполняющих определенные функции. На рис.2 приведена модель динамики системы «зуб – деталь», имеющей одну степень свободы (в направлении резания).

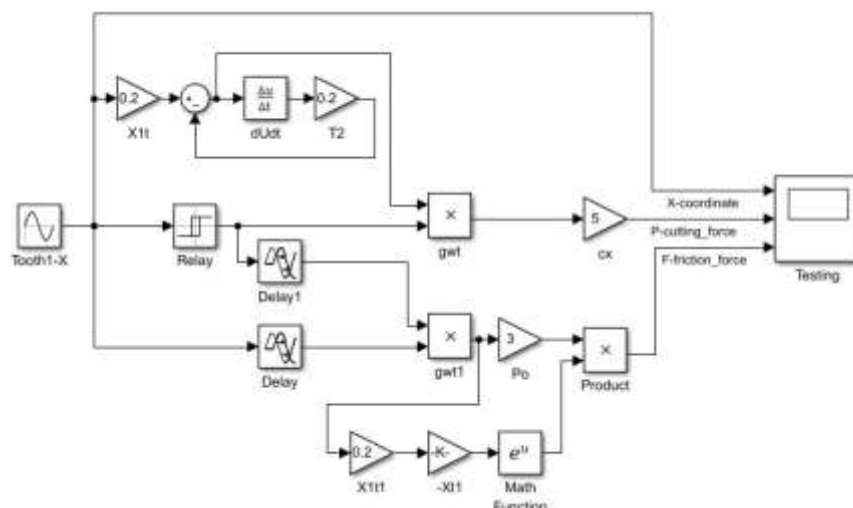


Рис.2. Имитационная модель системы «зуб – деталь» с рассмотрением одной степени свободы.

Кинематика режущей кромки зуба относительно оси X задается блоком «Tooth1-X». Группа верхних блоков осуществляет задержку силы резания относительно изменения припуска $U(t)$, блок «Relay» формирует «оконную функцию» $g(\omega \cdot t + \varphi_k)$, блоки «Delay» определяют угол опережения/отставания силы контактного взаимодействия относительно радиус-вектора от оси вращения фрезы к режущей кромке рассматриваемого зуба, три нижних блока формируют функцию силы контактного взаимодействия $F(t)$.

Начальные условия, заданные при моделировании, занесем в таблицу 1.

Таблица 1.

Значения параметров системы (9), используемые при моделировании.

Параметр	Обозначение	Значение
Угловая частота	ω	2π [рад/сек]
Жесткость резания	C_x, C_y	5
Коэффициент контактного взаимодействия	P_0	3
Угол отклонения силы резания	φ_{rez}	0 [рад]
Угол отклонения силы контактного взаимодействия	φ_{skv}	$\pi/5$ [рад]
Постоянная времени силы резания	T_1	0.2
Постоянная времени силы контактного взаимодействия	T_2	0.2
Угол входа зуба в деталь	φ_{start}	$\pi/6$ [рад]
Угол выхода зуба из детали	φ_{exit}	π [рад]

На рис. 3 приведены диаграммы, полученные в ходе моделирования. Отчетливо видно, что обе силы отстают по фазе от перемещения. Сила контактного взаимодействия изменяется по экспоненциальному закону, отчего ее скачки при низкочастотном фрезеровании особенно существенны.

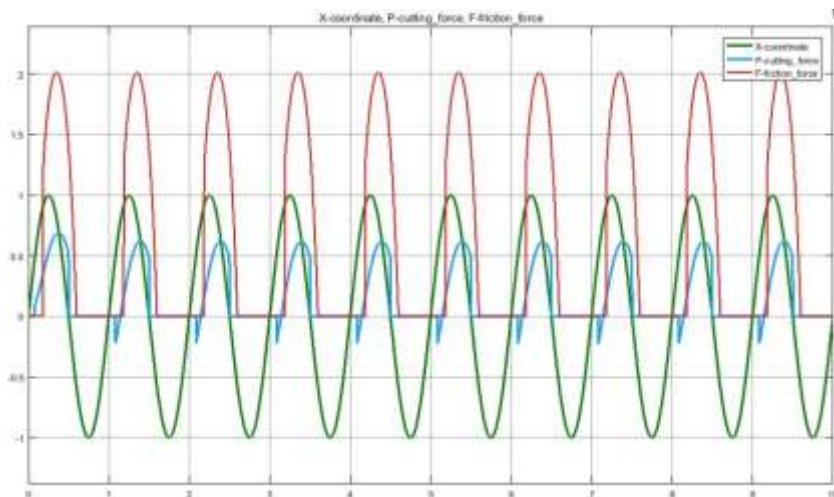


Рис.3. Перемещение, сила резания и сила контактного взаимодействия, возникающие при работе одного зуба фрезы в системе с одной степенью свободы.

Имитационная модель, приведенная на рис.2, учитывала лишь одну степень свободы динамической системы. Дополнив эту модель ее копией со сдвигом по фазе $\pi/2$, получим модель системы «зуб – деталь» с двумя степенями свободы. Также эта модель, приведенная на рис. 4, учитывает изменение толщины стружки в процессе фрезерования, зависящее как от угла положения режущей кромки зуба фрезы, так и от наличия контакта с обрабатываемой деталью. Параметр жесткости резания увеличен с 5 до 25.

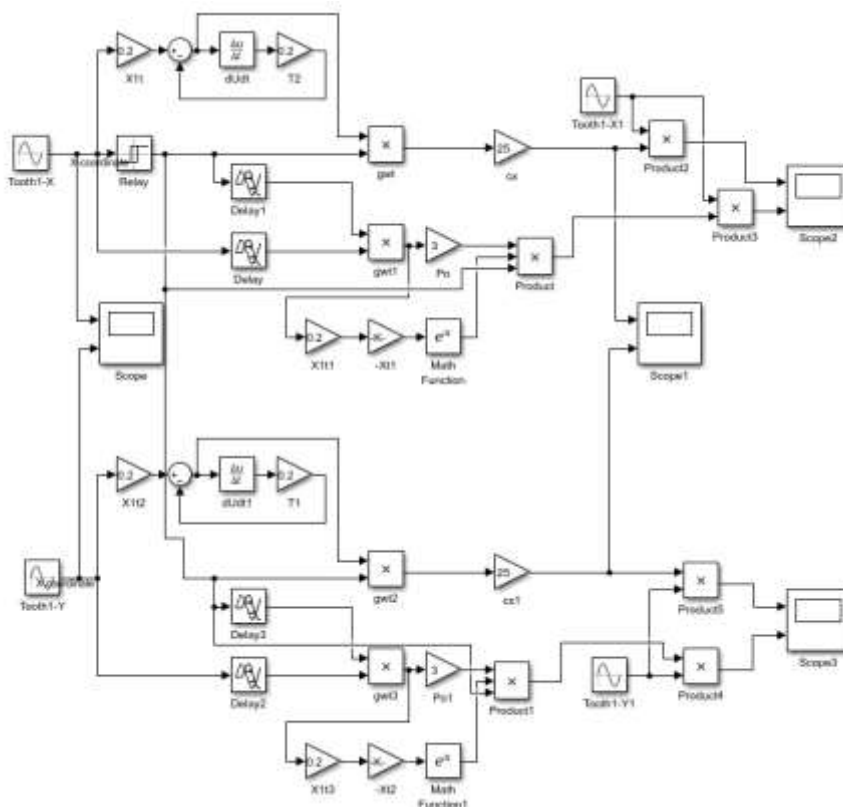


Рис.4. Имитационная модель системы «зуб - деталь» фрезерования с двумя степенями свободы.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис.5-6. На графиках наблюдается резкое нарастание силы резания вследствие вхождения зуба в обрабатываемую деталь и более мягкий выход зуба из заготовки ввиду уменьшения глубины резания до нуля. Такая форма сигнала связана с выбором следующих начальных условий: $\varphi_{\text{start}} = \pi/6$, $\varphi_{\text{exit}} = \pi$, следовательно, при врезании зуба толщина срезаемого им слоя будет иметь значение, равное половине максимального. Похожая ситуация наблюдалась при рассмотрении встречного фрезерования ($\varphi_{\text{start}} = 0$, $\varphi_{\text{exit}} = \pi/2$), при котором резкое уменьшение силы резания возникало при скачкообразном уменьшении толщины срезаемого слоя до нуля при выходе зуба из детали.

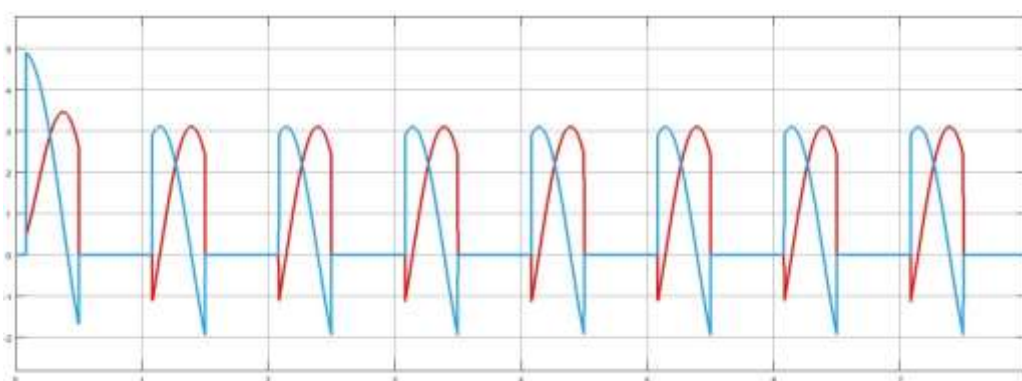


Рис.5. X- и Y-составляющие силы резания в системе «зуб - деталь».

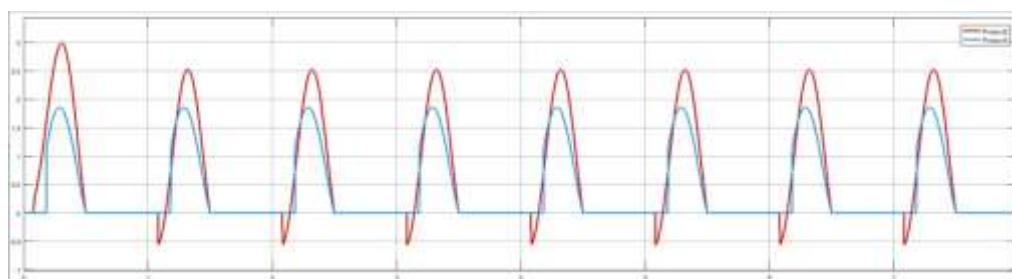


Рис.6. Силы резания и контактного взаимодействия по оси X при врезании в систему «зуб – деталь».

Имитационное моделирование системы «фреза – деталь». Моделирование работы системы «зуб – деталь» позволило наиболее наглядно исследовать изменение во времени возникающих в зоне резания сил. Выявлено периодическое изменение рассматриваемых сил в зависимости от величины снимаемого припуска, углов входа и выхода зуба из детали. Выявлено отставание силы резания тем больше, чем больше постоянная времени T_1 . Моделирование фрезы с несколькими зубьями позволит наглядно увидеть и оценить пульсации суммарных сил резания и контактного взаимодействия. Компьютерная модель системы «фреза – деталь» приведена на рис.7.

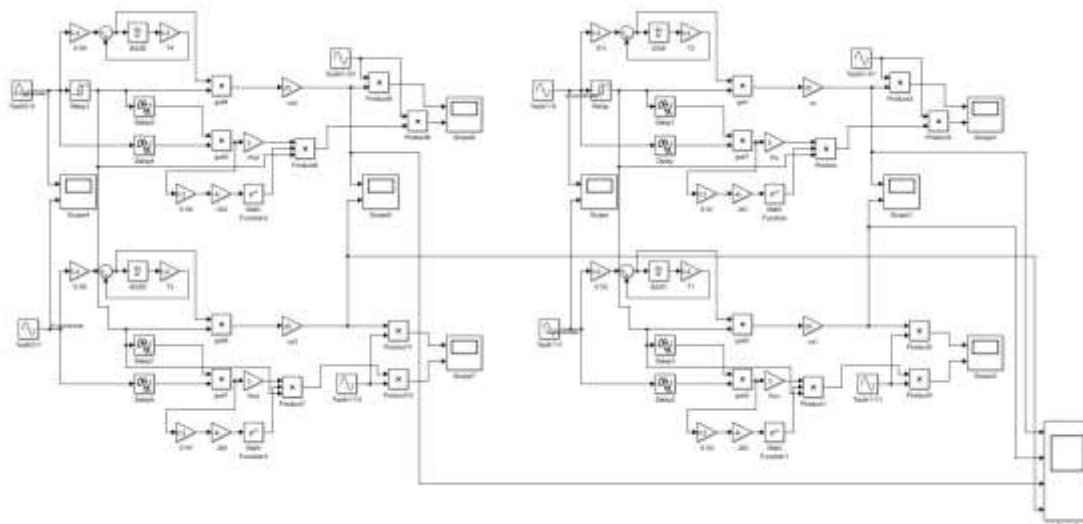


Рис.7. Имитационная модель системы «фреза – деталь».

Модель, приведенная на рис.7, представляет собой две связанные модели, приведенные на рис.4. Каждый из связанных блоков моделирует поведение отдельного зуба фрезы. Для каждой режущей кромки фрезы задается своя начальная фаза. Изменив кинематические параметры блоков семейства «Tooth», можно смоделировать эксцентриситет, дрожание или иную геометрическую неравномерность фрезы. Результаты имитационного моделирования приведены на рис.8.

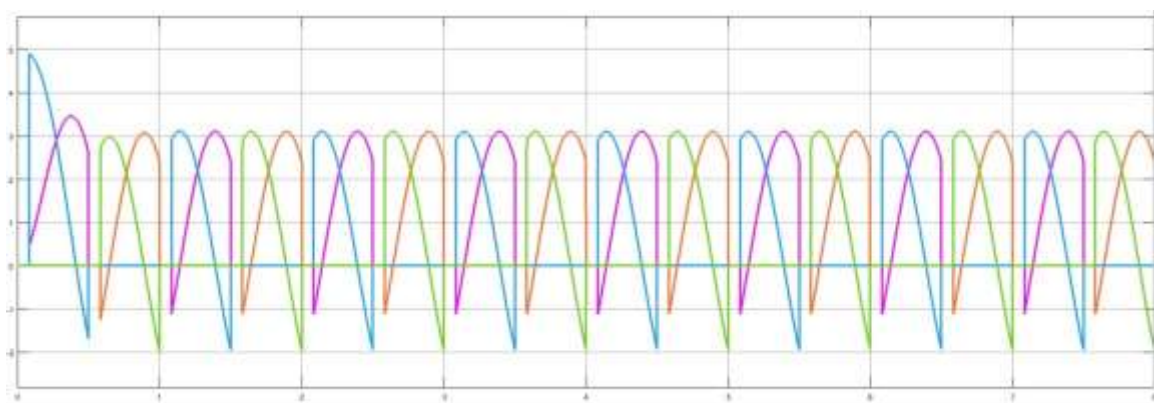


Рис.8. X- и Y-компоненты силы резания каждого зуба при обработке фрезой с двумя зубьями.

Путем введения моделей дополнительных зубьев в модель (Рис.7) можно исследовать динамику системы с n -м числом зубьев. На рис.9-11 представлены результаты моделирования.

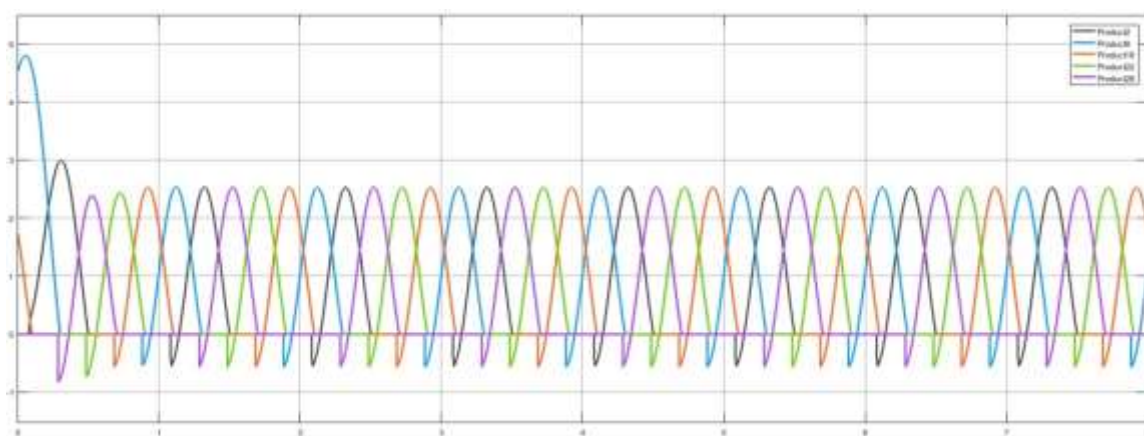


Рис. 9. X-составляющие сил резания при обработке фрезой с пятью зубьями.

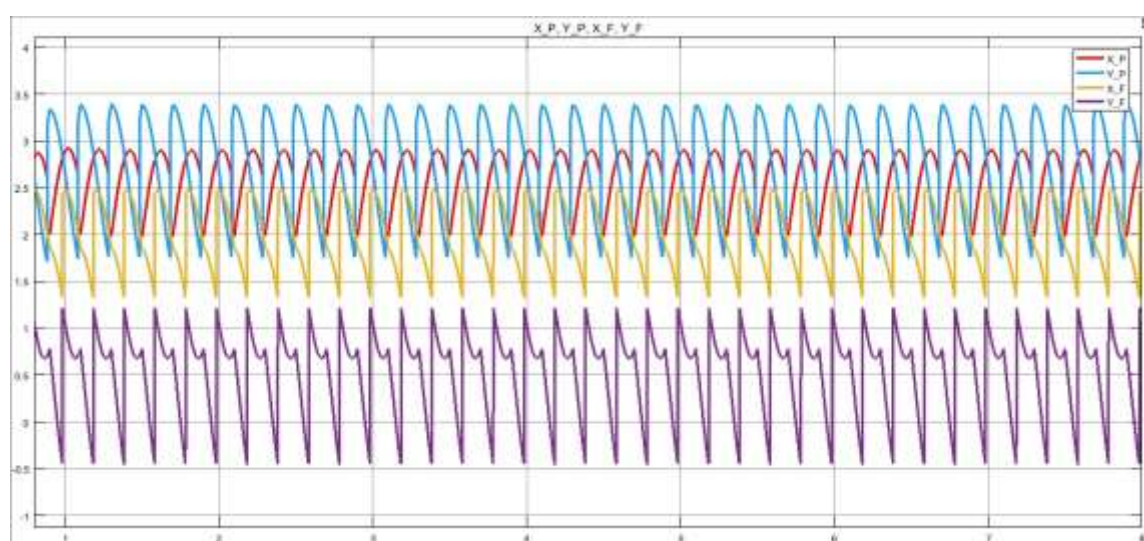


Рис.10. Суммарные X- и Y- составляющие сил резания и контактного взаимодействия при обработке фрезой с пятью зубьями.

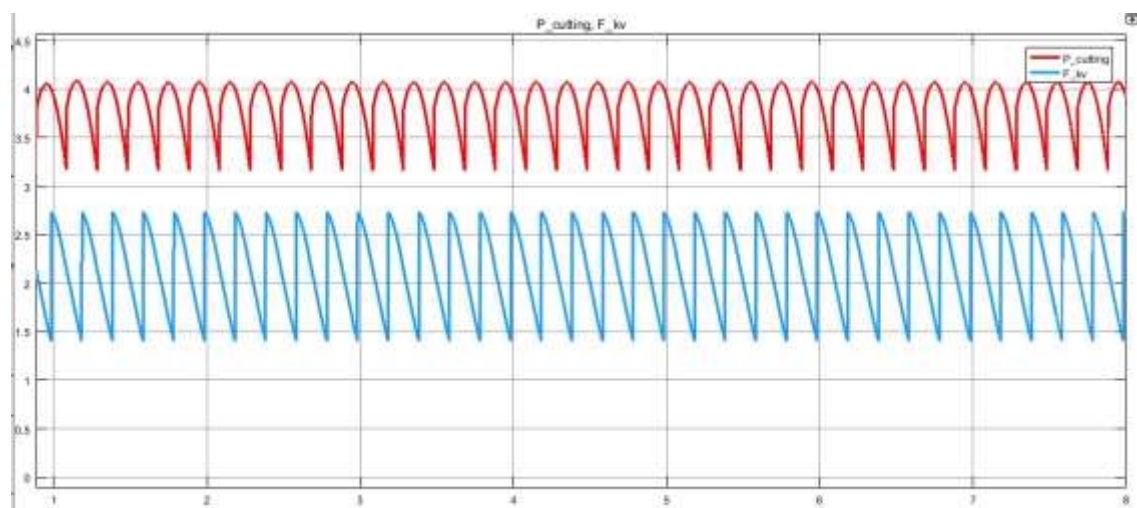


Рис.11. Суммарные силы резания и контактного взаимодействия при обработке фрезой с пятью зубьями.

Установлено, что при фрезеровании пятизубой фрезой суммарная сила резания изменяется в пределах 20% от максимального значения, а сила контактного взаимодействия задней поверхности с деталью – почти на 50% (при начальных условиях из таблицы 1). С увеличением числа зубьев, скорости вращения фрезы и уменьшением толщины срезаемого слоя на входе и выходе фрезы до нуля равномерность фрезерования увеличится. Другим широко распространенным способом повышения устойчивости фрезерования является использование фрез с винтовыми зубьями, что, однако, не исключает периодического изменения сил, возникающих в процессе резания.

Заключение. Авторами предложена модель динамических процессов при фрезеровании в системе «деталь-резец» с учетом физических особенностей сил контактного взаимодействия и резания. В работе предложена имитационная модель для исследования динамических процессов в зоне резания и приведены результаты моделирования. Выявлено периодическое изменение рассматриваемых сил в зависимости от величины снимаемого припуска. Показано, что при попутном фрезеровании, когда угол входа зуба в деталь φ_{start} не равен нулю, наблюдается увеличение амплитуды периодических возмущений силы резания, которую можно ограничить путем увеличения числа зубьев фрезы, уменьшения значения угла входа φ_{start} (увеличения угла φ_{exit}) и увеличением скорости вращения шпинделя n . Выявлено отставание силы резания тем большее, чем больше постоянная времени T_1 . Эти модели могут быть использованы как для оценки точности существующих металлорежущих фрезерных станков, так и при проектировании новых моделей высокоскоростных станков для анализа возникающих в них сил, влияющих на точность обработки. Проведенные имитационные исследования процесса резания позволили определить зависимости амплитуды и частоты вибровозмущений от скорости вращения шпинделя и геометрических параметров фрезы. Разработанные модели могут рассматриваться как инструменты станкостроителей для оценки гарантированной точности обработки материалов.

Список литературы

1. Ai. X. High Speed Machining Technology. - National Defense Industry Press, Beijing, 2003. - 256 p.
2. Z.F. Zhu, Application of high speed processing in mould manufacturing, Pub. Commun. Sci. Technol. - 09 (2012). – P. 137-139.
3. Altintas Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Ann. – Manuf. Technol. – 1995. - Vol.44, Issue.1. - P. 357-362.
4. Altintas Y. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling, JSME Int. J. Ser. C: Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf. – 2001. - Vol.44, Issue. 3. - P. 717-723.
5. Altintas Y. Manufacturing Automation, Metal Cutting Mechanics, Machine tool vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, New York, 2012. - 366 p.
6. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967, 359 с.
7. Zhang Y., Zhao B., Wang Y., Zhao B. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling / Y. Zhang, B. Zhao, Y. Wang, B. Zhao // Journal of Vibroengineering. – 2017. - Vol. 19, Issue 2. - P. 1062-1073.
8. Эстерзон М. А., Щеголев В. В. Дробление стружки на токарных станках с ЧПУ. В кн. : Оборудование с числовым программным управлением. - М.: НИИМАШ, 1981. - №2. - С. 7-10.

9. Альховский А. М. Исследование релаксационного процесса резания с дроблением стружки при точении: Дис. к. т. н. - Л.: ЛПИ, 1975. - 235 с.
10. Мансырев И. Г. Способы кинематического дробления стружки при резании / И. Г. Мансырев // Станки и инструмент. №2, 1976, С. 32-34.
11. Заковоротный В.Л. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. - Т.11., № 3 (54). - С. 301-311.
12. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process / G. Litak // Chaos, Solitons and Fractals. - 2002. – vol. 13. - P. 1531-1535.
13. Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения / А.П. Соколовский. - М. – Л.: Машгиз, 1946.
14. Заковоротный В.Л. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием / В.Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг, В.С. Быкадор // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2014. - № 3. – С. 26-39.
15. Заковоротный В.Л. Введение в динамику трибосистем / В.Л. Заковоротный, В.П. Блохин, М.И. Алексейчик. - Ростов-на-Дону: ИнфоСервис, 2004. – 680 с.
16. Тлусты И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлусты. – М.: Машгиз, 1956. – 395 с.
17. Быкадор, В. С. Возникновение автоколебаний в простейшей системе резания металлов / В. С. Быкадор, Г. Ю. Костенко, Т. С. Бабенко // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. — 2016. — Т.12, № 2. — С. 119-123.

Дата поступления: 24 февраля 2019 г.