

УДК 621.99

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Виталий Андреевич Косырев

*Студент 6 курса,  
кафедра «Инструментальная техника и технологии»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: О.В. Мальков,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и  
технологии»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В современном машиностроении наблюдается тенденция существенного увеличения скорости резания путем применения новых инструментальных материалов с износостойкими покрытиями, что приводит к росту вибраций в зоне резания. Вибрации в зоне резания являются причиной уменьшения производительности обработки резанием, уменьшения точности, снижения стойкости инструмента и т.д. В данной работе производится исследование влияния вибраций на точность обработки резьб при резьбофрезеровании. Первостепенной задачей является оценка степени значимости данного влияния. В случае его высокой значимости следует произвести определение параметров обработки резьбы, влияющих на величину параметров вибраций, с целью снижения влияния вибраций в зоне резания на точность.

Сравнительно массивные подвижные узлы и детали, невысокая жесткость узлов, а также подвижных и неподвижных стыков, несовпадение центров жесткости с центрами масс определяют необходимость рассмотрения многомассовой системы со многими степенями свободы.

На первоначальном этапе произведено упрощенное моделирование процесса резьбонарезания для одномассовой диссипативной системы с одной степенью свободы с возбуждающей силой  $F(t)$ . Схематически данная модель представлена на рис. 1.

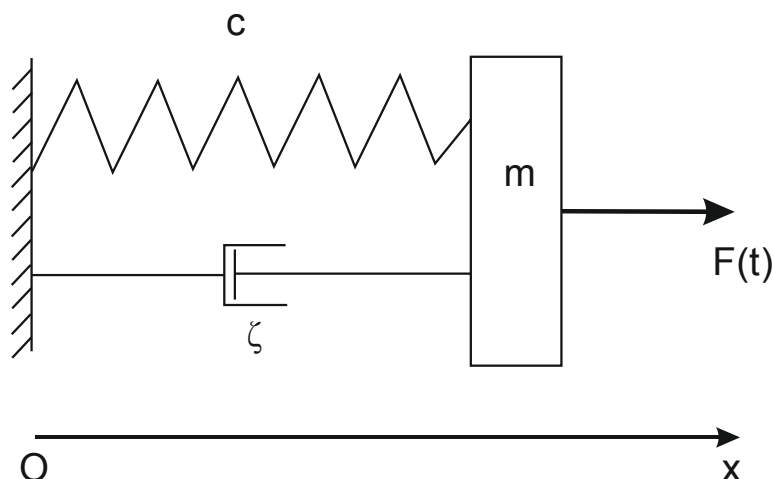


Рис. 1. Одномассовая диссипативная система с одной степенью свободы и с возбуждающей силой  $F(t)$ .

Данная система описана уравнением:

$$m\ddot{x} + R(\dot{x}) + cx = F(t), \quad (1)$$

где  $x$  – координата, вдоль которой совершаются колебания, мм;  $m$ - приведенная масса системы, кг;  $c$  – жесткость системы,  $\frac{\text{кг}\cdot\text{рад}^2}{\text{с}^2}$ ;  $R(\dot{x})$  – слагаемое, отражающее влияние диссипации в системе, мН [1]. Данная модель имеет четыре составляющие, подлежащие отдельному моделированию: масса  $m$ , жесткость  $c$ , диссипативная сила  $R$ , возбуждающая сила  $F(t)$ .

Возбуждающим силовым воздействием в данной модели является сила резания. Вдоль направления действия этой силы направлена ось  $x$  (рис.1).

Были рассмотрены теоретическая и эмпирическая модели силы резания при резьбофрезеровании.

Теоретическая модель позволяет рассчитать силу резания в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, нарезаемой резьбы, подачи на зуб фрезы и положения зуба фрезы в заготовке (рис. 2).

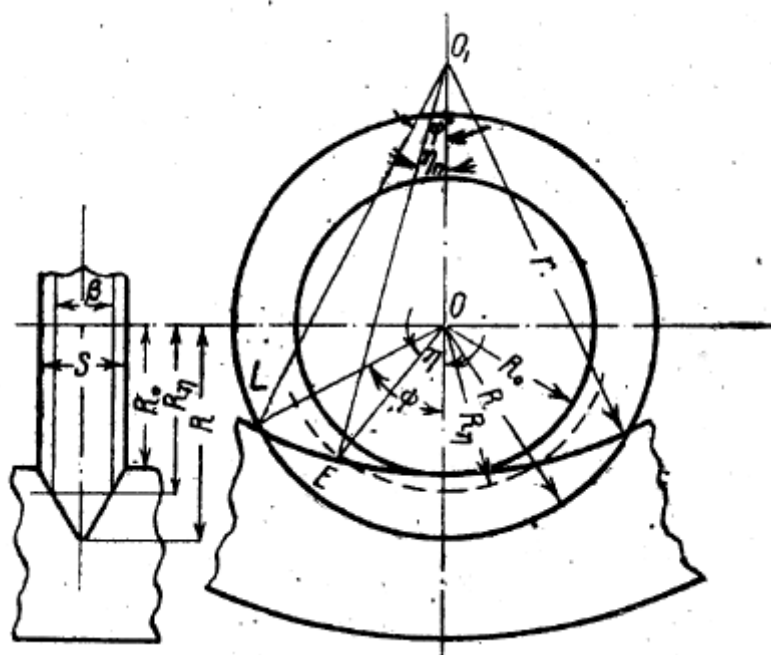


Рис. 2. Схема фрезерования внутренней резьбы

Сила рассчитана через крутящий момент:  $P_z = \frac{M_{кр}}{R} \cdot g$ ,

где  $P_z$ - искомая сила, Н;  $R$  – радиус вершин резьбовой фрезы, мм;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – гравитационная постоянная;  $M_{кр}$  – крутящий момент на фрезе, кг·мм.

Рассмотрен случай участия в резании одного зуба фрезы на каждой нитке [3].

$$M_{кр} = k \cdot S_z^{\mu+1} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{\mu+1} \cdot \frac{1}{s} \cdot R \cdot b \cdot \sin^{\mu+1}\eta, \quad (2)$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент, зависящий от качества обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы. Для стали средней твердости с пределом прочности 500 МПа  $k = 242$ .  $S_z$ - подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $r$  – радиус вершин изделия, мм;  $e$  - расстояние между осями фрезы и обрабатываемой заготовки, мм;  $l$  – длина нарезки, мм;  $s$  - шаг резьбы, мм;  $\eta$  - мгновенный угол, определяющий положение зуба фрезы, рад;  $\mu$  - безразмерный коэффициент, равный для стали - 0,25;  $b$  - ширина рабочей части профиля зуба фрезы, мм (рис. 2).

$$b = 2 \cdot (R - R_\eta) \cdot \tan \frac{\beta}{2},$$

где  $\beta$  - угол профиля резьбы, рад;  $R_\eta$  – радиус бесконечно узкой фрезы, для которой мгновенный угол зуба является углом охвата, мм. По теореме косинусов:

$$R_{\eta} = \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos \eta_n},$$

где  $\eta_n$  – угол, определяющий положение точки С, лежащей на поверхности заготовки и являющейся точкой ее пересечения с поверхностью бесконечно узкой фрезы, для которой мгновенный угол зуба является углом охвата, рад (рис. 2).

$$\eta_n = \eta \cdot \frac{R_0}{r},$$

где  $R_0$  – наименьший радиус профиля зуба фрезы, мм.

Мгновенный угол  $\eta$  был выражен через время и частоту вращения фрезы:

$$\eta = \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \quad (3),$$

где  $n$  – частота вращения фрезы, об/мин;  $t$  – время, с.

Окончательно формула для определения силы резания записана следующим образом:

$$P_z = 242 \cdot S_z^{0,75} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{0,75} \cdot \frac{1}{S} \cdot g \cdot \left( R - \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \cdot \frac{R_0}{r}\right)} \right) \cdot \tan \frac{\beta}{2} \cdot \sin^{0,75} \left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}\right) \quad (4)$$

Таким образом, значение силы резания для случая, если в резании участвует  $m$  зубьев на каждой нитке равно:

$$P_z = 242 \cdot S_z^{0,75} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{0,75} \cdot \frac{1}{S} \cdot g \cdot \sum_{i=1}^m \left( b_i \cdot \sin^{0,75} \left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} - (i-1) \cdot \varphi_0\right) \right),$$

где  $b_i$  – ширина рабочей части профиля  $i$ -го зуба фрезы, участвующего в резании, мм.

$$b_i = 2 \cdot \left( R - \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos\left(\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} - (i-1) \cdot \varphi_0\right) \cdot \frac{R_0}{r}\right)} \right),$$

где  $\varphi_0$  – угловой шаг между зубьями фрезы, рад.

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{z},$$

где  $z$  – количество зубьев у фрезы, шт.

Вывод эмпирической зависимости произведен в соответствии с [2] и [4]. Составляющие силы резания представлены в виде:

$$F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t) - \text{окружная составляющая силы резания.}$$

$$F_n(t) = K_{n1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{n2} \cdot u(t) - \text{радиальная составляющая силы резания.}$$

Здесь:  $K_{t1}, K_{t2}, K_{n1}, K_{n2}$  – безразмерные эмпирические коэффициенты;  $u(t)$  – толщина срезаемого слоя одним зубом для данного момента времени, мм;  $h(t)$  – ширина срезаемого слоя одним зубом для данного момента времени, мм.

Расчет толщины и ширины срезаемого слоя произведен по [2]:

$u(t) = S_z \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$  – на участке резания зуба до достижения им вертикальной оси;

$u(t) = S_z \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$  – на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси;

$$h(t) = \frac{b_1}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}; \text{ где } b_1 = S - 2 \cdot b_{\eta},$$

где  $S$  – ширина резбофрезы, мм (рис.2).

$$S = 2 \cdot (R - R_0) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right),$$

где  $R$  – радиус вершин резбовой фрезы, мм;  $R_0$  – наименьший радиус профиля зуба фрезы, мм;  $b_{\eta}$  – ширина участка зуба фрезы, погруженного в заготовку, мм.

$$b_{\eta} = (R_{\eta} - R_0) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

В данных формулах аргументом тригонометрических функций служит значение угла  $\eta$  (3). Поскольку этот угол отмеряется от вертикальной оси, то аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба до достижения им вертикальной оси является выражение:  $\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$ . Аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси является выражение:  $\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$

Методика определения данной эмпирической зависимости разработана на основе [2]:

1.1 При помощи динамометра Kistler определяются составляющие силы резания  $F_x, F_y$  при резьбофрезеровании в неподвижной системе координат, связанной со станком (x,y).

1.2. Пересчитываются значения составляющих силы резания из проекций  $F_x, F_y$  на оси неподвижной системы координат, связанной со станком (x,y), в проекции  $F_t, F_n$  на оси подвижной системы координат, связанной с инструментом (t,n) (рис. 5).

1.3. После пересчета определяется среднее значение максимумов окружной и радиальной составляющих силы резания.

1.4. Далее из построенных графиков составляющих вычленяется один цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему.

1.5. Для вычисления значений коэффициентов  $K_{t1}, K_{t2}, K_{n1}, K_{n2}$  применяется алгоритм Нелдера-Мида, при помощи функции Matlabfminsearch, реализующей данный алгоритм.

1.6. В зависимости от полученных результатов может понадобиться внести коррекцию в найденные коэффициенты  $K_{t1}, K_{t2}, K_{n1}, K_{n2}$ , в виде поправочных коэффициентов.

1.7. Эта часть работы осуществлена на координатно-расточном станке с ЧПУ модели 24K40СФ4 кафедры МТ2.

Технологический эскиз резьбонарезания представлен на рис. 4.

Обработка осуществлена при следующих условиях:

Обрабатываемый материал: Д16Т; инструмент: Фреза 327-16B32EC-09 с пластиной 327R09-18 350MM-THSandvikCoromant.

Геометрические параметры инструмента: передний угол:  $4^\circ$ ; задний угол:  $19^\circ$ ; количество зубьев: 3; диаметр вершин резьбофрезы:  $D = 17,642$  мм.

Геометрические параметры отверстия заготовки: диаметр: 30 мм; длина: 20 мм; расстояние между осями резьбофрезы и заготовки:  $e = 8,47$  мм.

Геометрические параметры витка нарезаемой резьбы: диаметр впадины витка: 34,64 мм; шаг: 2,68 мм; угол профиля нарезаемой резьбы:  $\beta = 60^\circ$ . Натуральная резьба заменялась фрезерованием канавки треугольного профиля.

Режим обработки: глубина резания:  $t = 2,32$  мм; подача на зуб:; частота вращения шпинделя:  $n = 1600$  об/мин (скорость резания:  $v = 88,92$  м/мин); круговая подача:  $S_{кр} = 240 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$  ( $S_z = 0,05$  мм/зуб).

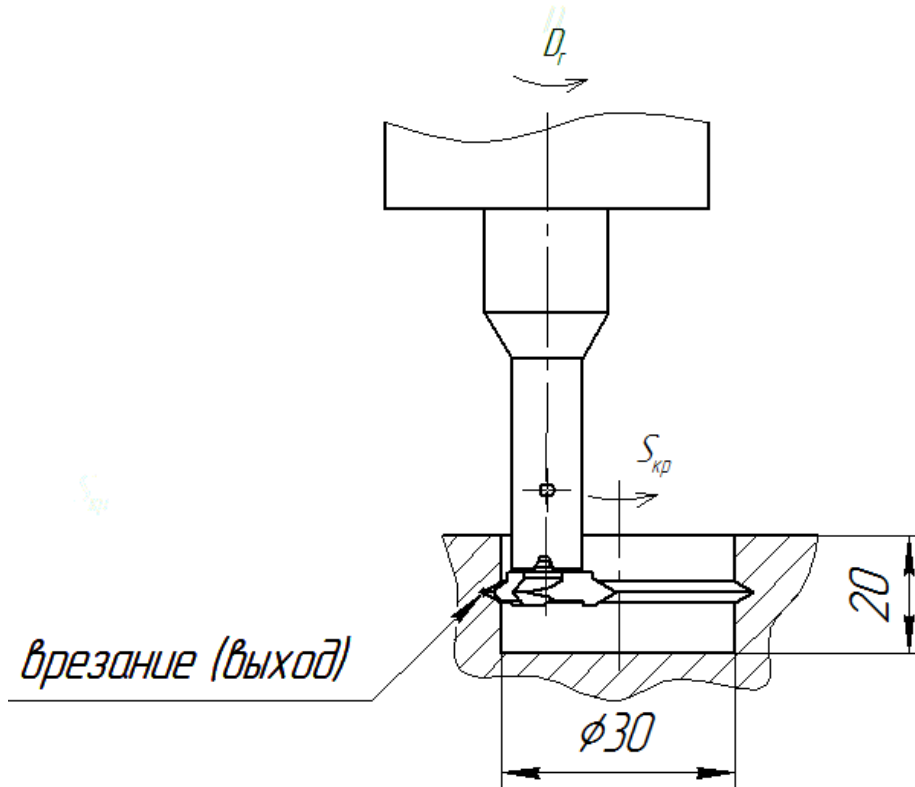


Рис. 4. Технологический эскиз резьбонарезания

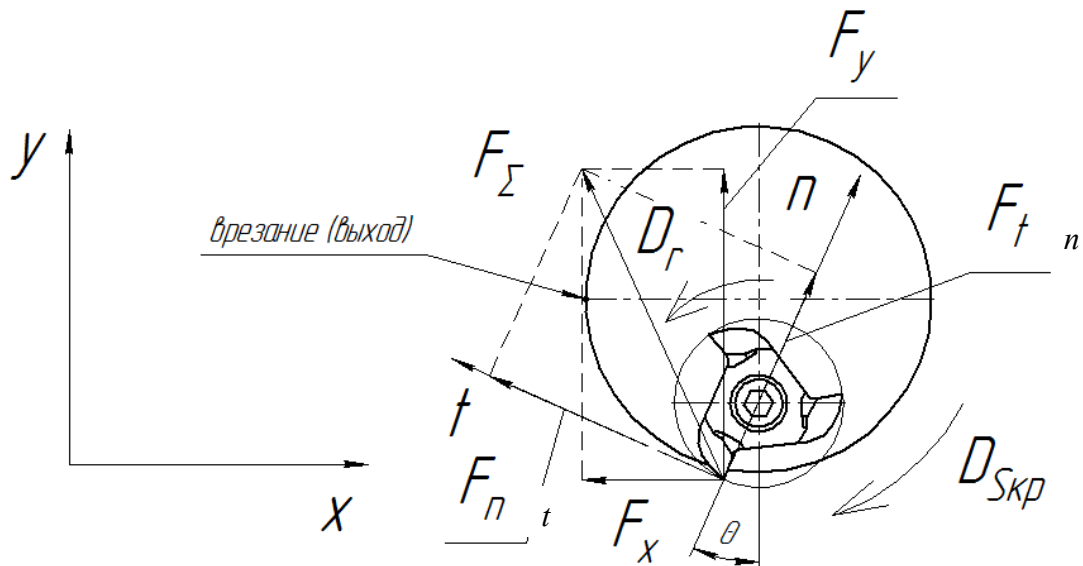


Рис. 5. Проекция силы резания на оси подвижной и неподвижной системы координат

Пересчет осуществлен по формуле, представленной в [2]:

$$\begin{pmatrix} F_t \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix},$$

где  $\theta$  – угол между вертикалью и радиальной составляющей силы резания, рад.

Данный угол складывается из угла  $\eta(3)$  и углового положения фрезы в отверстии при ее планетарном движении.

График составляющих силы резания имеют циклическую структуру с периодом цикла, равным  $\frac{1}{n \cdot z}$ , где  $z=3$  – количество зубьев.

Система вычисляет значения коэффициентов  $K_{t1}, K_{t2}, K_{n1}, K_{n2}$ , благодаря которым значения составляющих силы  $F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t)$  и  $F_n(t) = K_{n1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{n2} \cdot u(t)$  приближаются к значениям силы из вычлененного цикла, полученным экспериментально.

Для реализации данного алгоритма необходимо некоторое количество итераций, т.к. необходимо правильно задаться начальными значениями коэффициентов  $K_{t1}, K_{t2}, K_{n1}, K_{n2}$ . Правильные начальные значения коэффициентов можно определить только методом подбора. Найденные коэффициенты являются постоянными для данного режима резания.

После реализации резбофрезерования были получены следующие значения силы резания в проекциях на оси неподвижной системы координат (x,y) (рис.6):

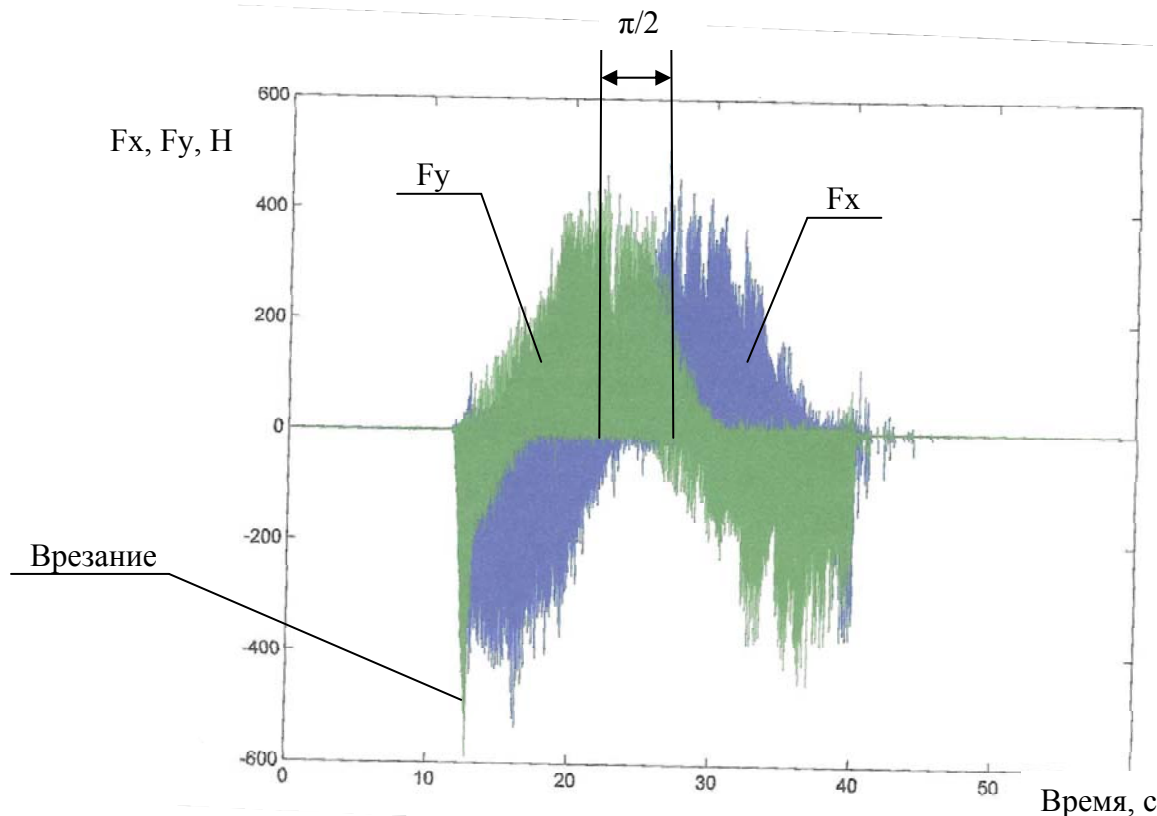


Рис. 6. Экспериментальные значения силы резания в проекциях на оси неподвижной системы координат

Как видно из рис. 6, графики описывают тригонометрическую зависимость, друг относительно друга они смещены на  $\frac{\pi}{2}$ .

Далее был произведен пересчет проекций силы на оси неподвижной системы координат в проекции силы на оси подвижной системы координат (см. пт.1.2.). Была подсчитана только окружная составляющая силы.

Результаты представлены на рис. 7, 8:

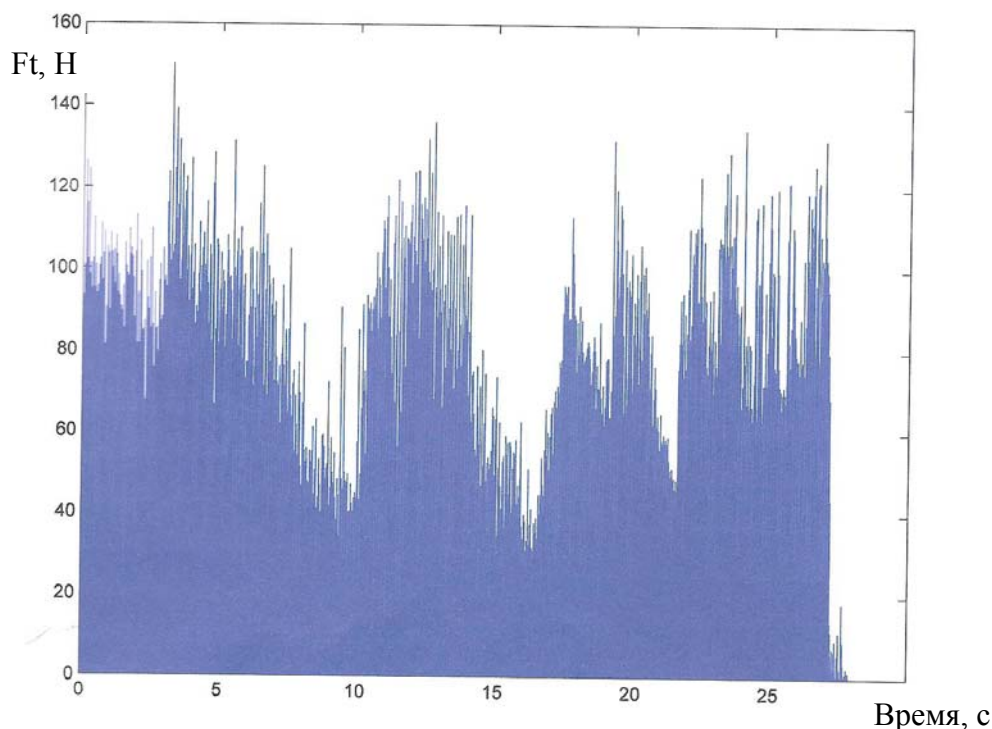


Рис. 7. Окружная составляющая силы резания

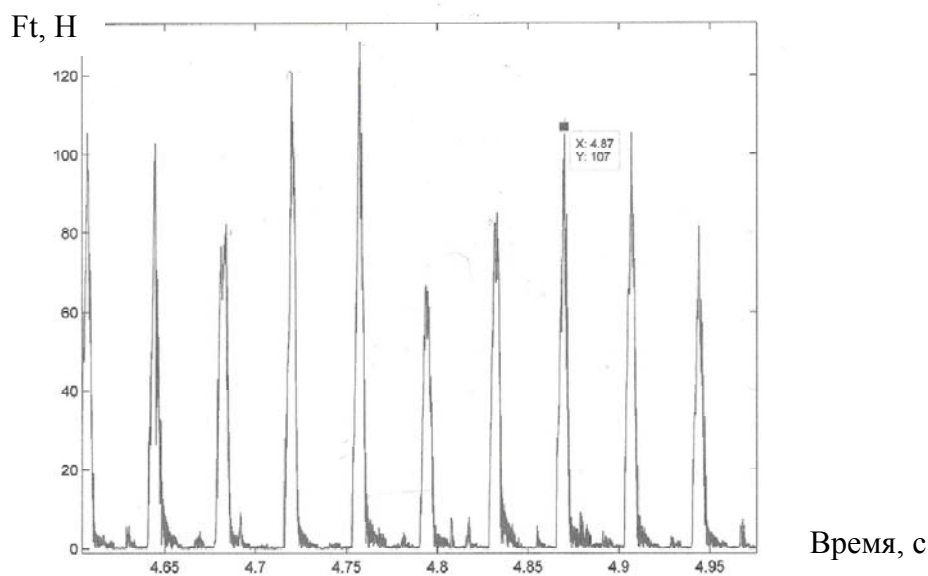


Рис. 8. Увеличенный участок графика окружной составляющей силы резания

Рис. 8 представляет собой увеличенный участок графика из рис. 7. Как видно из графиков, максимум силы постоянно меняется в зависимости от времени. По теории на каждом цикле сила должна достигать одного и того же максимума, т.к. условия резания у каждого режущего зуба, внедряющегося в металл, одинаковы.

Оказался несоответствующим ожиданиям период каждого цикла: по теории он должен быть равен  $\frac{1}{n \cdot z}$ , что для данных условий обработки равно 0,0125 секунд. Однако на графике средний период равен приблизительно 0,0375 секунд, то есть в три раза

больше ожидаемого. Это говорит о том, что в резании участвует только один зуб. Это подтверждено наблюдениями зубьев самой фрезы после работы: следы резания обнаружены только на одном зубе из трех. Объяснение данного несоответствия следует осуществить в дальнейшем. В качестве одной из версий предложено, что вибрации фрезы при резании имели частоту, близкую к собственной частоте вибраций фрезы вместе с патроном и шпинделем станка, однако замеры, произведенные при помощи резонансного молотка показали, что частота собственных колебаний фрезы с патроном и шпинделем станка в три раза превышает значения частоты вращения шпинделя и равно приблизительно 83 Гц. Также было выражено предположение, что в резании участвует только один зуб, по причине сильного радиального биения фрезы в цанговом патроне. Однако замеры биения показали, что два зуба из трех находятся на одной и той же окружности с точностью до микрометра, а значит находятся в резании.

Далее было вычислено среднее значение максимумов окружной составляющей силы резания, которое оказалось равным 63 Н.

Далее из построенных графиков составляющих был вычленен один цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему.

График этого цикла представлен на рис. 9:

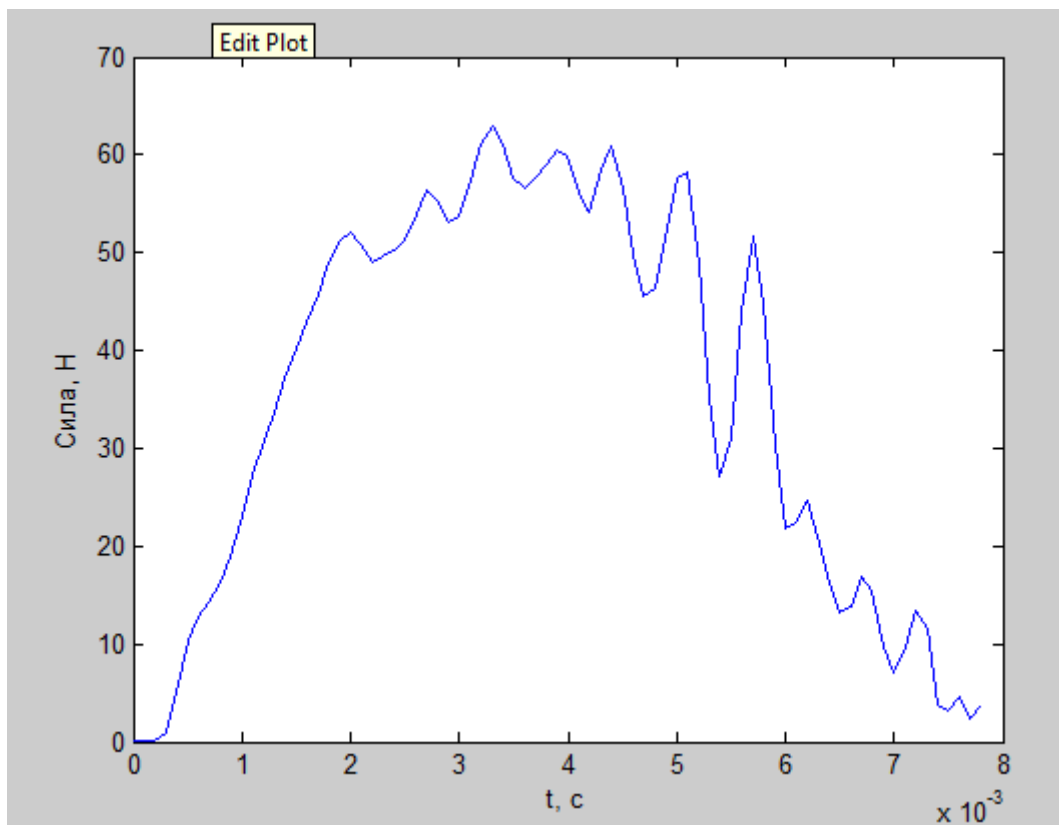


Рис. 9. цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему

Для вычлененных значений был применен алгоритм Нелдера-Мида для вычисления коэффициентов  $K_{t1}, K_{t2}$  формулы  $F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t)$  при помощи функции `Matlabfminsearch`, реализующей данный алгоритм.

Система вычисляет значения коэффициентов  $K_{t1}, K_{t2}$ , благодаря которым значения окружной силы, вычисленной по формуле  $F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t)$ , приближаются к значениям силы из вычлененного цикла, полученным экспериментально.

Значения коэффициентов получены равными:  $K_{t1} = 0,0011, K_{t2} = 0,001$ .



Таким образом полученное уравнение выглядит следующим образом:

$$F_t(t) = 0,0011 \cdot b(t) \cdot h(t) + 0,001 \cdot b(t)$$

Однако значения силы, полученные по данной формуле получились меньше экспериментальных примерно в 716426 раз. Именно на это число домножаются коэффициенты  $K_{t1}, K_{t2}$ .

Таким образом, получается следующее уравнение окружной силы:

$$F_t(t) = 788 \cdot b(t) \cdot h(t) + 716,4 \cdot b(t)$$

На рис. 10 представлены два графика: силы, полученной экспериментально и силы вычисленной по полученной формуле для одного цикла.

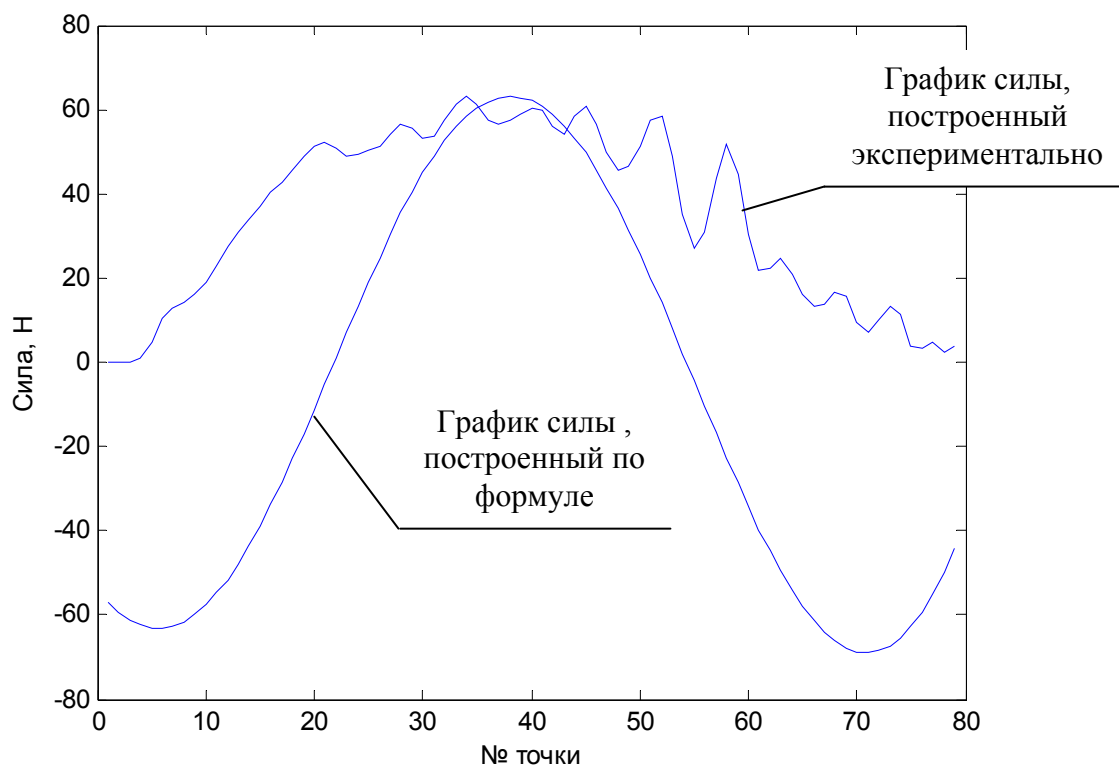


Рис. 10. Графики силы, полученной экспериментально и силы вычисленной по полученной формуле для одного цикла

В результате анализа графиков сделаны следующие выводы:

Положительные результаты моделирования окружной составляющей силы резания:

1. График силы, вычисленной по формуле, имеет один максимум.
2. Максимум силы, вычисленной по формуле, совпадает с максимумом силы, полученной экспериментально, по абсолютному значению (63 Н).
3. Положение максимума силы, вычисленной по формуле, приблизительно совпадает с максимумом силы, полученной экспериментально.

Отрицательные результаты моделирования окружной составляющей силы резания:

1. Имеется достаточно большая разница (около 100%) между силой, вычисленной по формуле, и силой, полученной экспериментально, в начале и в конце цикла.
2. В начале и в конце цикла сила заходит в отрицательную область, чего на практике быть не может.

Объяснения отрицательных результатов:

Отрицательные результаты объясняются неточностью формул для подсчета толщины и ширины срезаемого слоя, взятых из [2]. Точные формулы для вычисления этих параметров для резьбофрезерования отсутствуют в литературе, и выводом этой формулы следует заняться в дальнейшем.

Далее была осуществлена подстановка описанных моделей окружной силы резания в дифференциальное уравнение колебаний [1] вида:

$\ddot{x} + 2q\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F_t(t)$ ; где  $\omega_0 = 167,55$  рад/с – частота собственных колебаний, получающаяся из частоты вращения шпинделя;  $q$  – коэффициент демпфирования (1/с).

$q = \xi\omega_0$ , где  $\xi = 0,03$  – коэффициент.

$q = \xi\omega_0 = 0,03 \cdot 167,55 = 5,03$  1/с

$m = 0,1$  кг – приведенная масса системы в первом приближении принятая массе резьбофрезы [6].

$F_t(t)$  – вынуждающая сила, равная окружной составляющей силы резания.

Таким образом, окончательно дифференциальное уравнение (ДУ) имеет вид:

$$\ddot{x} + 10,053 \cdot \dot{x} + 28073,541 \cdot x = 10 \cdot F_t(t) \quad (5)$$

ДУ численно решено в приложении MATLAB 7.10.0. при помощи солвераode23 (функции, позволяющей решить ДУ второго порядка одношаговым методом, использующим модифицированную формулу Розенборка второго порядка).

Решение найдено для трехзубой односточной резьбофрезы. Диаметры заготовки и фрезы подобраны так, чтобы в работе участвовал только один зуб, причем одновременно с выходом из заготовки одного зуба в нее внедрялся следующий.

Аргументом тригонометрических функций служит значение угла  $\eta(3)$ . Поскольку этот угол отмеряется от вертикальной оси, то аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба до достижения им вертикальной оси является выражение:  $\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$ . Аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси является выражение:  $\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$

Таким образом видно, что разные промежутки времени работы фрезы внутри одного оборота описаны разными ДУ, а значит решение находится «склеивкой» решений данных уравнений при помощи начальных условий. При этом начальными условиями для каждого следующего ДУ служат значения координаты и скорости в последней точке решения предыдущего ДУ.

Результат решения при использовании эмпирической формулы силы представлен на рис. 11, 12.

Виброперемещение, мм

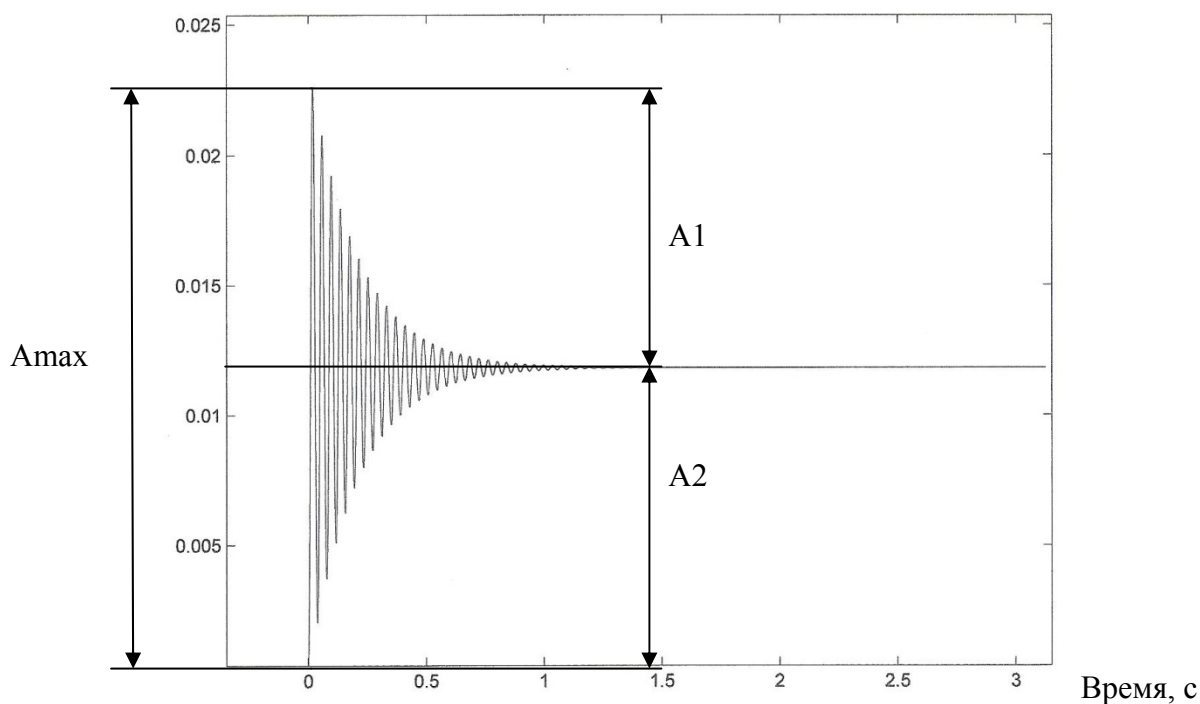


Рис. 11. Графическое решение дифференциального уравнения при использовании эмпирической формулы силы

Виброперемещение, мм

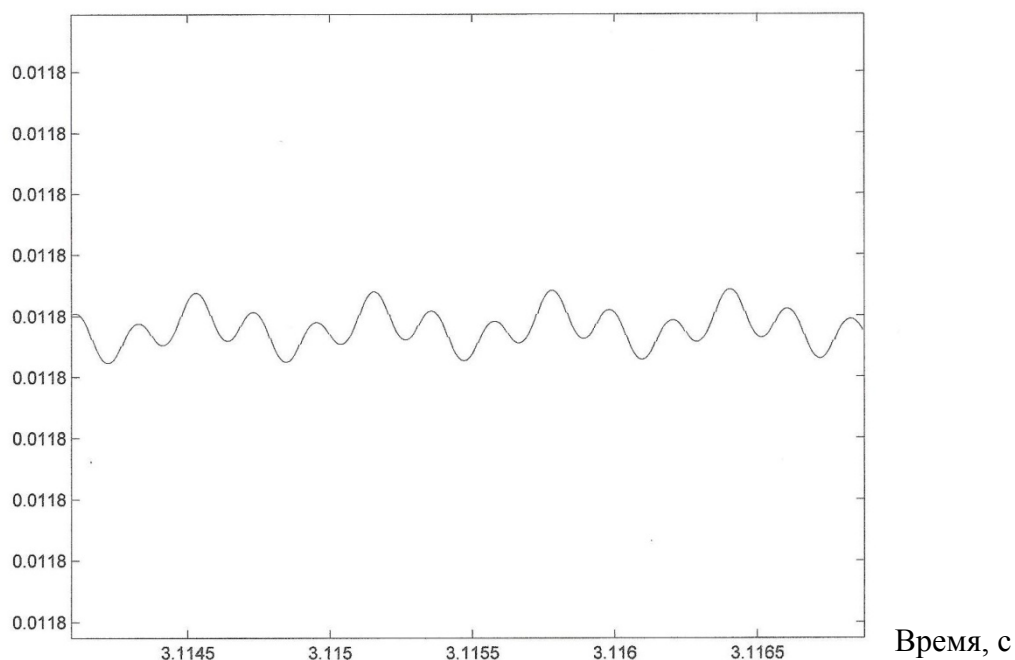


Рис. 12. Увеличенный участок графического решения при использовании эмпирической формулы силы

На рис. 11 представлен общий график виброперемещений. В первоначальный момент времени происходит резкий всплеск перемещений до значения  $A_{max}=25,5$  мкм. Далее происходит стабилизация колебаний вокруг значения  $A_2=11,828$  мкм. На рис. 12

представлен участок кривой виброперемещений на участке после стабилизации. Из него видно, что коридор значений виброперемещений вокруг значения  $A_2$  равен  $1,122$  нм.

Результат решения при использовании теоретической формулы силы представлен на рис. 13, 14. По оси ординат отложено виброперемещение в мм, по оси абсцисс отложено время в секундах.

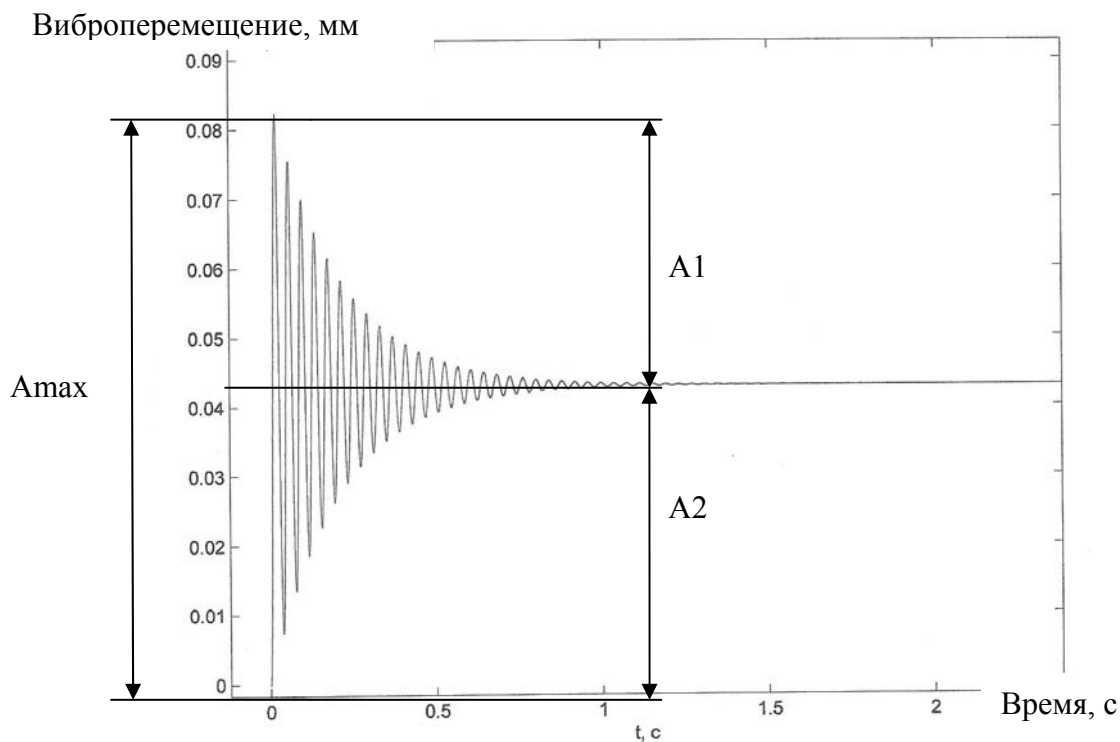


Рис. 13. Графическое решение дифференциального уравнения при использовании теоретической формулы силы

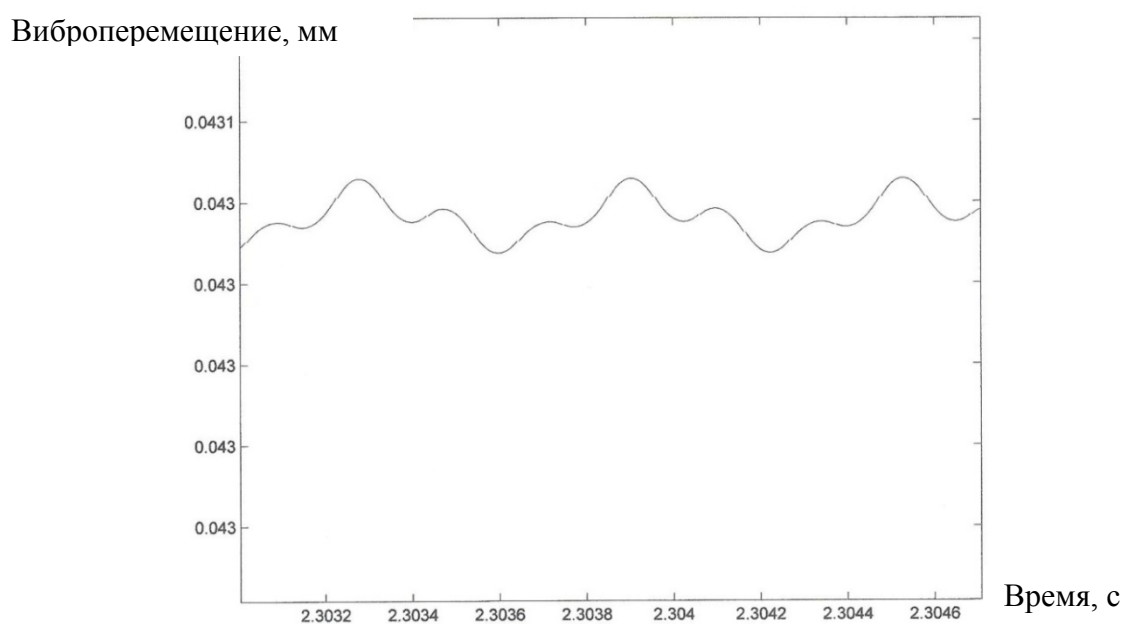


Рис. 14. Увеличенный участок графического решения при использовании теоретической формулы силы

Рис. 13 представляет собой общий график виброперемещений. В первоначальный момент времени происходит резкий всплеск перемещений до значения  $A_{max}=83$  мкм. Далее происходит стабилизация колебаний вокруг значения  $A_2=43,049$  мкм. Рис. 14 представляет собой участок кривой виброперемещений на участке после стабилизации. Из него видно, что коридор значений виброперемещений вокруг значения  $A_2$  равен 4,591 нм.

Для определения приведенной массы, жесткости и демпфирования системы была разработана следующая методика.

- 1.1. Производится виброударное тестирование с использованием вибромолотка.
- 1.2. Строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебаний фрезы с патроном и шпинделем.
- 1.3. Строится график зависимости силы удара вибромолотком от времени.
- 1.4. По полученным графикам определяются искомые параметры для модели с двумя степенями свободы. В данном случае колебания раскладываются на радиальную и окружную составляющие. При этом коэффициент демпфирования определяется из АЧХ, а приведенная масса и жесткость – из АЧХ и графика зависимости силы удара вибромолотком от времени.

На рис. 15 представлен процесс формирования профиля нарезаемой резьбы зубом резьбообразующей части инструмента. Из рисунка видно, что впадина нарезаемой внутренней резьбы (поз. 1) формируется при последовательном (поз. 2) перемещении инструмента (поз. 3) вдоль пространственной траектории движения (поз. 4). В результате вибраций при резьбофрезеровании фреза отклоняется, в том числе, и в радиальном направлении от заготовки, и находится в коридоре между пространственной траекторией движения (поз. 4) и линией отклонения зуба фрезы в результате вибраций (поз. 5), а значит, полученная резьба может выходить за пределы допуска по среднему диаметру и диаметру вершины [5].

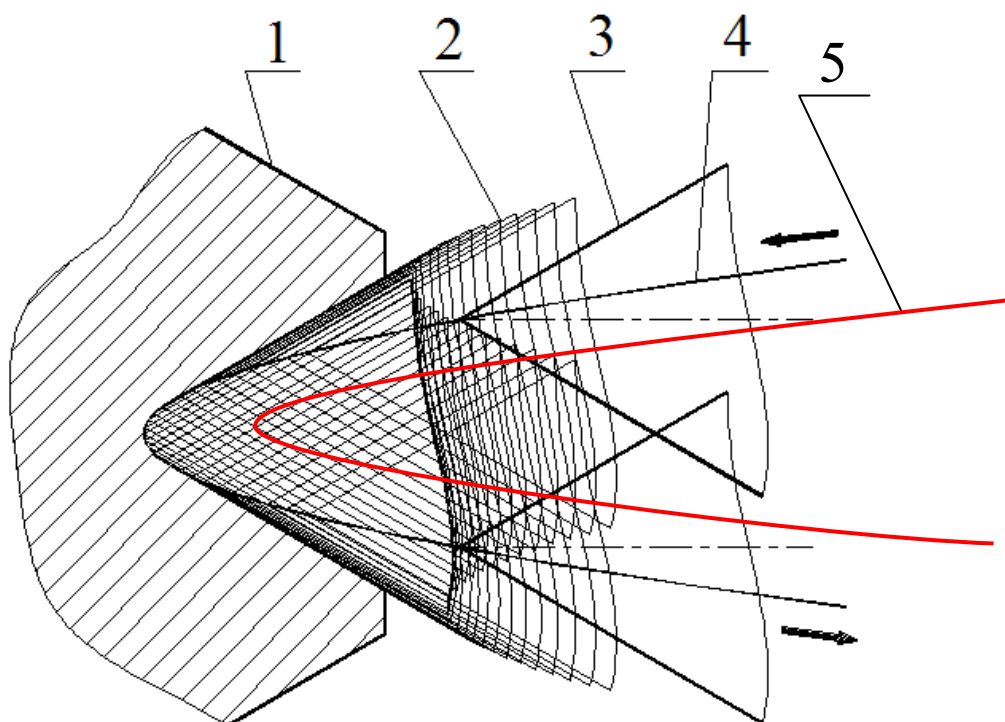


Рис. 15. Влияние виброперемещений на точность резьбофрезерования

В проведенном эксперименте фрезеруется резьба с номинальным диаметром 30 мм и шагом 2,68 мм. По ГОСТ 16093-81 выбрана ближайшая по величине шага резьба: М30х3. Данная резьба, выполняемая по третьей степени точности (как по самой точной), имеет допуск на средний диаметр, равный 85 мкм. Самое высокое значение виброперемещений, полученное входе решения дифференциального уравнения было равно 83 мкм, то есть не вышло за поле допуска.

Допуск на диаметр вершин данной резьбы, выполненной по четвертой (наивысшей) степени точности, равен 280 мкм, то есть значительно выше допуска на средний диаметр. Допуск на диаметр впадин внутренней резьбы стандартом не предусмотрен.

По результатам работы был сделан вывод: при данных условиях эксперимента виброперемещения не превышают величины допусков на диаметр вершин и на средний диаметр.

### Литература

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Anna Carla Araujo, Jose Luis Silveira, Shiv Kapoor. Force prediction in thread milling. – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18-21 мая 2003.
3. Зорохович А.А. Резьбофрезерование и резьбофрезерные станки. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. – 148 с.
4. Altintas Y. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design. – Cambridge University press, 2000 – 286 с.
5. Мальков О.В. Исследование точности резьбы при резьбофрезеровании сверло-резьбофрезой. – Наука и образование, №11, ноябрь 2007.
6. Грубый С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резаками: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 107с.