

УДК 628.517

doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-13-25

Влияние сил в зоне резания на движение привода подачи фрезерного станка*

А.И. Ермолаев¹, В.И. Ерофеев¹, А.С. Плехов²¹ Институт проблем машиностроения Российской академии наук² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

The Influence of Forces in the Cutting Zone on the Feed Drive Movement of a Milling Machine

A.I. Ermolaev¹, V.I. Erofeev¹, A.S. Plekhov²¹ Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Science² Nizhny Novgorod State University named after Lobachevsky

Анализ влияния механических процессов обработки металла фрезерованием на точность отработки рабочим органом (столом с заготовкой) программно заданного закона движения посредством комплекса электроприводов подачи является актуальной проблемой. Обзор научной литературы выявил отсутствие работ, посвященных оценке пульсаций сил в зоне резания при фрезеровании и их влиянию на движение электроприводов подачи. Разработана математическая модель процесса фрезерования, учитывающая две степени свободы, с использованием которой получена имитационная модель, позволяющая исследовать пульсации силы в зоне резания по значению и направлению. Исследование показало, что при фрезерной обработке (особенно цилиндрическими и торцевыми фрезами) амплитуда пульсаций силы в зоне резания может достигать 50 % среднего значения. Исследование влияния параметров режимов резания на относительное движение стола и фрезы позволило установить связь между скоростью ее вращения, подачей на зуб, ошибкой позиционирования и ошибкой, обусловленной характеристиками электропривода подачи. Получены выражения для колебаний моментов нагрузки выходных валов электроприводов и колебаний скоростей их вращения, вызываемых этими пульсациями.

Ключевые слова: электропривод подачи, точность управления движением, точность обработки деталей, сила резания, момент нагрузки, регулируемый электропривод

An analysis of the influence of mechanical processes of metal milling on the accuracy of machining by a working body (a table with a workpiece) when the feed is controlled by a software program through a series of electric drives is an important problem. A review of literature revealed a lack of works on the estimation of force pulsations in the cutting zone during milling and their effect on the feed drive movement. To solve this problem, the authors of the article developed a mathematical model of the milling process that took into account two degrees of freedom, using which a simulation model was obtained to study pulsations of the force in the cutting zone in magnitude and direction. The study showed that during milling, especially with cylindrical and face mills, the amplitude of force pulsations in the cutting zone can reach 50% relative to the average value. The study of the influence of the milling parameters on the relative movement of the working body and the

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2019–2022 гг. по теме № 0035-2019-0027 (№ госрегистрации 01201458047) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-48-520010-р_а).

cutter made it possible to establish a relationship between the rotational speed of the cutter, feed per tooth and positioning error, as well as the error due to the characteristics of the feed drive. Expressions of the load torque fluctuations of the output shafts of the electric drives and the fluctuations of their rotation speeds caused by force pulsations were obtained.

Keywords: feed drive, movement control accuracy, machining accuracy, cutting force, load torque, adjustable electric drive

Тема исследования и уменьшения погрешностей, определяющих точность обработки деталей из металла фрезерованием, разносторонне отражена в отечественной и зарубежной литературе [1–6]. Вместе с тем актуальной задачей остается изучение погрешности, вызванной ошибкой позиционирования стола с заготовкой относительно закона программного движения, формируемого числовым программным управлением (ЧПУ), которая в среднем составляет 10...15 % общей погрешности формы изготовленной детали [4].

Сложность изучения этой составляющей погрешности вызвана как междисциплинарностью исследований, так и многообразием видов передаточных механизмов, приводов и двигателей, колебательные процессы и деформации в которых приводят к возникновению этой ошибки [6].

В качестве приводов подачи большинства современных станков выступают асинхронные и синхронные сервоприводы, а также приводы с бесколлекторными двигателями с постоянными магнитами [1–3].

Точность привода подачи фрезерного станка зависит от многих факторов: способа управления движением стола с заготовкой, жесткости элементов и соединений кинематической цепи электропривода, момента нагрузки (сопротивления), приведенного к валу привода, его динамической характеристики, закона управления движением рабочего органа (РО) и т. п. [6].

Цель работы — исследование влияния переменного момента сопротивления на точность управления движением РО на примере регулируемого асинхронного электропривода подачи.

Ошибки регулирования скорости. Рассмотрим структуру, в которой подача стола осуществляется регулируемым асинхронным электроприводом, передаточный механизм представляет собой валопровод, жестко связанный с электродвигателем и РО (столом с заготовкой), а программное движение — равномерное перемещение РО [6].

В процессе обработки металла фрезерованием на валу электропривода подачи возникают и исчезают механические нагрузки, определяющие значение момента сопротивления. Их влияние на скорость наиболее существенно в области низких частот вращения. В области высоких частот вращения, как правило, электродвигатель работает вхолостую, а конструктивные и подвижные элементы не подвержены перегрузкам.

Большую часть производственного цикла электропривод подачи функционирует в области низких частот под действием переменного момента сопротивления, вызванного силами в зоне резания. Нижняя граница рабочего диапазона скоростей обусловлена пониженной устойчивостью функционирования электродвигателя в условиях колебаний как момента сопротивления, так и электрических параметров, а также нагревом электродвигателя [6].

Момент сопротивления M_c (Н·м) снижает скорость вращения электродвигателя Ω на некоторую величину $\Delta\Omega$, определяемую выражением [6, 7]

$$\Delta\Omega = \frac{M_c}{\beta_s}, \text{ мин}^{-1},$$

где β_s — жесткость механической характеристики электропривода, Н·м·мин.

Статическая ошибка скорости вращения электродвигателя, вызванная действием момента сопротивления, вычисляется по формуле [6]

$$s = \frac{M_c}{\Omega\beta_s} \cdot 100 \%,$$

При работе электропривода в диапазоне малых скоростей даже незначительные колебания момента сопротивления вызывают существенные пульсации Ω . Причем относительная ошибка регулирования скорости вращения может достигать нескольких процентов. Для приводов подачи в диапазоне малых скоростей вращения электродвигателя относительная ошибка s не должна превышать 10 % [6].

Отклонения этой скорости от среднего значения, вызванные непостоянством момента сопротивления, изменением режима и ограниченной плавностью ее регулирования, в установленном режиме можно оценить с помощью безразмерного параметра неравномерности [6]

$$k_{\delta} = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_{cp}} = \frac{2(\Omega_{max} - \Omega_{min})}{\Omega_{max} + \Omega_{min}}, \quad (1)$$

где Ω_{cp} , Ω_{max} и Ω_{min} — среднее, максимальное и минимальное значение скорости вращения электродвигателя соответственно.

В регулируемых электроприводах коэффициент неравномерности k_{δ} не должен превышать 0,2, а ошибка определения скорости — 1% [5, 6, 8]. Ошибка может принимать большие значения, если указанное условие не выполняется.

Высокая неравномерность движения перемещаемого РО существенно снижает качество обработанной поверхности детали, а при $k_{\delta} > 0,4$ привод подачи металлорежущего станка теряет устойчивость, т. е. не способен функционировать в соответствии с заданными требованиями. Параметр k_{δ} можно уменьшить, ограничив диапазон скоростей вращения электропривода в области низких частот [6].

Колебания силы в зоне резания, возникающей при фрезеровании. При фрезеровании формообразующие движения обеспечиваются движением стола со скоростью v_x , управляемым приводами подачи, в то время как само резание осуществляется вращающейся фрезой. Физическая модель попутного фрезерования, учитывающая две степени свободы, приведена на рис. 1.

Сила резания при фрезеровании относительно действительного значения толщины срезаемого слоя $X(t)$ описывается следующим выражением [9, 10]:

$$P(t) = cU(t). \quad (2)$$

Здесь c — жесткость резания, учитывающая жесткость обрабатываемого материала и режущего инструмента, Н·м; $U(t)$ — закон изменения силы резания с учетом запаздывания, м,

$$\dot{U}(t)T_2 + U(t) = X(t), \quad (3)$$

где T_2 — постоянная времени резания (стружкообразования), с [11].

Жесткость резания c в формуле (2) характеризует жесткость соединения деталь — резец и

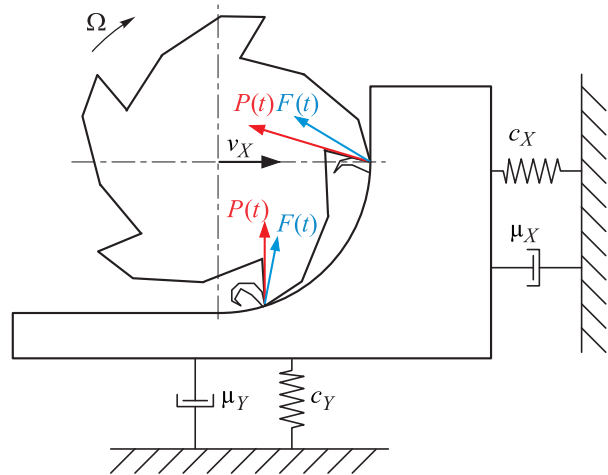


Рис. 1. Физическая модель попутного фрезерования, учитывающая две степени свободы

представляет собой коэффициент пропорциональности между силой и глубиной резания [12, 13].

Сила контактного взаимодействия между обработанной поверхностью детали и задней поверхностью резца (далее сила контактного взаимодействия) выражается следующим образом [9, 14]:

$$F(t) = P_0 e^{-\frac{X(t)}{T_1}}, \quad (4)$$

где P_0 — коэффициент, характеризующий сопротивление перемещению резца в деталь [15]; T_1 — параметр, определяющий крутизну изменения силы контактного взаимодействия от глубины врезания в заготовку.

Суммарная сила, возникающая в зоне резания и действующая на фрезу, может быть получена с помощью выражений (2)–(4) и описывается следующей системой уравнений [16]:

$$\left\{ \begin{aligned} \Sigma F_x(t) &= \\ &= \sum_{k=1}^z U_k(t)c \cos(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k)g(\omega t + \varphi_k) + \\ &+ \sum_{k=1}^z P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} \cos(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k)g(\omega t + \varphi_k); \\ \Sigma F_y(t) &= \\ &= \sum_{k=1}^z U_k(t)c \sin(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k)g(\omega t + \varphi_k) + \\ &+ \sum_{k=1}^z P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} \sin(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k)g(\omega t + \varphi_k). \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Здесь $F_x(t)$ и $F_y(t)$ — проекции сил контактного взаимодействия на оси X и Y ; z — число

зубьев фрезы; $U_k(t)$ — закон изменения силы резания, создаваемой k -м зубом фрезы; ω — угловая частота; φ_{rez} и φ_{skv} — углы, которые составляют с касательной плоскостью к обрабатываемой поверхности соответственно сила резания и сила контактного взаимодействия, рад; φ_k — начальная фаза k -го зуба фрезы, рад; $g(\omega t + \varphi_k)$ — оконная функция, определяющая наличие контакта зуба с заготовкой,

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

где φ_{start} и φ_{exit} — углы поворота фрезы, при которых происходит соответственно врезание k -го зуба в заготовку и его выход из заготовки, рад.

На рис. 2 приведена схема процесса обработки винтовой фрезой. Толстой синей линией обозначено положение режущей кромки k -го зуба фрезы, участвующего в процессе резания, красными линиями — поперечные сечения и ось вращения фрезы, тонкими синими линиями — угол φ_ω , характеризующий запаздывание h -го сечения относительно того, которое первым осуществляет врезание зуба в заготовку.

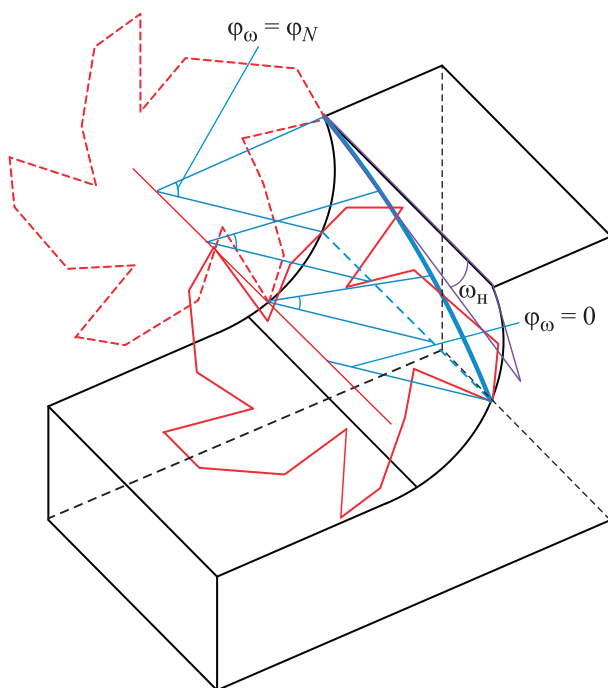


Рис. 2. Обработка детали цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями

Известно [17], что наименьшие пульсации будут достигнуты при соблюдении соотношения

$$\frac{Bz \operatorname{tg} \omega_n}{\pi d} = q, \quad (6)$$

где B — ширина фрезерования (длина фрезерной головки, участвующая в резании); d — диаметр фрезы; ω_n — угол наклона зубьев к оси фрезы; q — целое число.

Если условие (6) соблюдено, то вынужденные колебания силы резания в области фрезерования отсутствуют, так как в любой момент времени сила резания одного зуба уравновешена действием сил резания прочих зубьев, участвующих в обработке [17]. На автоколебательные процессы принцип суперпозиции не распространяется. На практике это условие практически не соблюдается, поскольку зачастую невозможно задать ширину фрезы B , удовлетворяющую условию (6).

Рассмотрим случай обработки детали фрезой с винтовыми зубьями. Разобьем винтовую фрезу на N одинаковых фрагментов с помощью h поперечных сечений, где $h = N - 1$. Представим, что каждый такой фрагмент является участком прямозубой фрезы, сдвинутым относительно соседнего на некоторый угол φ_ω .

Врезание k -го зуба в заготовку первым совершает элемент, ограниченный сечением с углом $\varphi_\omega = 0$, а последним — элемент, ограниченный сечением с углом $\varphi_\omega = \varphi_N$, где φ_N — угол, определяющий врезание последнего элемента фрезы в заготовку. Каждый h -й элемент будет иметь фазовый сдвиг относительно сечения с углом $\varphi_\omega = 0$:

$$\varphi_\omega = \frac{2h-1}{2N} \varphi_N.$$

Если угол φ_N принимает незначительные значения, то его с достаточной точностью можно определить по формуле

$$\varphi_N = \operatorname{arctg} \frac{2B \operatorname{tg} \omega_n}{d}.$$

Согласно выражению (5), суммарные проекции силовых действий каждого из участков фрезы в зоне резания имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \Sigma F_X(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^z [U_k(t)c \cos(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k - \varphi_\omega) \times \\ &\times g(\omega t + \varphi_k)] + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^z [P_0 e^{-X_k(t)/T_1} \times \\ &\times \cos(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k - \varphi_\omega) g(\omega t + \varphi_k)]; \\ \Sigma F_Y(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^z [U_k(t)c \sin(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k - \varphi_\omega) \times \\ &\times g(\omega t + \varphi_k)] + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^z [P_0 e^{-X_k(t)/T_1} \times \\ &\times \sin(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k - \varphi_\omega) g(\omega t + \varphi_k)]. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Просуммируем полученные проекции всех N элементов фрезы, после чего заменим суммирование интегрированием, предположив, что $N \rightarrow \infty$. Тогда на основании уравнений (7) получим математические модели динамики фрезерной обработки детали с помощью цилиндрической или торцевой фрезы с винтовыми зубьями:

$$\begin{aligned} \Sigma F_X(t) &= \sum_{k=1}^z \left[U_k(t)cg(\omega t + \varphi_k) \times \right. \\ &\times \left. \int_0^{\varphi_N} \cos(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k - \varphi_\omega) d\varphi_\omega \right] + \\ &+ \sum_{k=1}^z \left[P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} g(\omega t + \varphi_k) \times \right. \\ &\times \left. \int_0^{\varphi_N} \cos(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k - \varphi_\omega) d\varphi_\omega \right] = \\ &= \sum_{k=1}^z U_k(t)cg(\omega t + \varphi_k) [\cos(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k) \sin \varphi_N + \\ &+ \sin(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k)(1 - \cos \varphi_N)] + \\ &+ \sum_{k=1}^z P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} g(\omega t + \varphi_k) [\cos(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k) \sin \varphi_N + \\ &+ \sin(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k)(1 - \cos \varphi_N)]; \quad (8) \\ \Sigma F_Y(t) &= \sum_{k=1}^z \left[U_k(t)cg(\omega t + \varphi_k) \times \right. \\ &\times \left. \int_0^{\varphi_N} \sin(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k - \varphi_\omega) d\varphi_\omega \right] + \\ &+ \sum_{k=1}^z \left[P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} g(\omega t + \varphi_k) \times \right. \\ &\times \left. \int_0^{\varphi_N} \sin(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k - \varphi_\omega) d\varphi_\omega \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=1}^z U_k(t)cg(\omega t + \varphi_k) [\sin(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k) \sin \varphi_N - \\ &- \cos(\omega t + \varphi_{rez} + \varphi_k)(1 - \cos \varphi_N)] + \\ &+ \sum_{k=1}^z P_0 e^{-\frac{X_k(t)}{T_1}} g(\omega t + \varphi_k) [\sin(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k) \sin \varphi_N - \\ &- \cos(\omega t + \varphi_{skv} + \varphi_k)(1 - \cos \varphi_N)]. \quad (9) \end{aligned}$$

Суммарные силы $\Sigma F_X(t)$ и $\Sigma F_Y(t)$ являются вынуждающими силами для колебательной системы фреза — резец. Подставив силы (8) и (9) в закон затухающих колебаний, учитывающий упругие и диссипативные процессы, получим иное описание динамики системы резания [16]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_X & 0 \\ 0 & m_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_X & 0 \\ 0 & \mu_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} c_X & 0 \\ 0 & c_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{rez}, \quad (10) \end{aligned}$$

где m_X , m_Y , μ_X , μ_Y , c_X , c_Y — коэффициенты массы, демпфирования и жесткости механической системы фрезерования по осям X и Y соответственно; $x(t)$ и $y(t)$ — перемещение механической системы фрезерования относительно заданного положения по осям X и Y соответственно; \mathbf{F}_{rez} — матрица суммарных сил, возникающих в процессе фрезерования, соответствующая выражениям (8) и (9).

При описании процесса резания в уравнениях динамики необходимо учесть начальную фазу каждого из зубьев фрезы в начальный момент времени. Суммарную силу резания можно найти, сложив полученные выражения для каждого зуба по каждой из координатной осей. Полагаем, что фреза не имеет дефектов, державка не деформируется при резании, обрабатываемая деталь и рабочий инструмент имеют правильную форму, а процесс резания принимаем установившимся и равномерным [16].

Для исследования динамических процессов при фрезеровании и верификации математической модели (10) использовано имитационное моделирование.

Имитационное моделирование процесса фрезерования. Начальные условия для имитационного моделирования приведены в таблице. В качестве нулевого значения угла положения k -го зуба фрезы выбрана угловая координата, лежащая на пересечении с осью ординат в верхней полуплоскости (см. рис. 1). Фреза вращается по часовой стрелке.

**Значения параметров
математических моделей (8)–(10),
использованные при моделировании**

Параметр	Значение
Угловая частота ω , рад/с	2π
Жесткость резания c , Н/м	25
Коэффициент контактного взаимодействия P_0	3
Угол отклонения, рад силы резания φ_{rez} силы контактного взаимодействия φ_{skv}	0 $\pi/5$
Постоянная времени силы резания T_2 , с	0,2
Параметр силы контактного взаимодействия T_1	0,2
Угол входа зуба в деталь φ_{start} , рад	$\pi/6$
Угол выхода зуба из детали φ_{exit} , рад	π
Угловое смещение между крайними режущими сечениями фрезы φ_N , рад	$\pi/6$
Коэффициент массы механической системы фрезерования, кг: по оси X m_X по оси Y m_Y	0,5 0,5
Коэффициент демпфирования, Н·с/м: по оси X μ_X по оси Y μ_Y	0,1 0,1
Коэффициент жесткости, Н/м: по оси X c_X по оси Y c_Y	10^7 10^7

На основе математической модели (10) разработана имитационная модель однозубого фрезерования, структурная схема которой приведена на рис. 3. Эта модель учитывает изменение составляющих сил в зоне резания с амплитудами $P_X^*(t)$, $P_Y^*(t)$, $F_X^*(t)$, $F_Y^*(t)$ при изменении толщины срезаемого слоя в процессе фрезерования, зависящем как от угла положения режущей кромки зуба фрезы, так и от наличия контакта с обрабатываемой деталью.

Динамику фрезерования инструментом с h -м числом зубьев можно исследовать объединением нескольких моделей однозубого фрезерования (см. рис. 3). Структурная схема, описывающая синтез такой модели, приведена на рис. 4. Полученная модель позволяет исследовать как динамику суммарной силы, возникающей в зоне резания при фрезеровании, так и ее отдельных составляющих. На рис. 5 приведены осциллограммы суммарных сил резания и контактного взаимодействия, действующих в рабочей плоскости фрезерования, при резании винтовой фрезой с пятью зубьями

Анализ результатов моделирования процессов фрезерования. С помощью описанной имитационной модели фрезы выполнено исследование ее динамических характеристик для определения амплитуды пульсаций силы в зоне резания и для оценки влияния условий режима

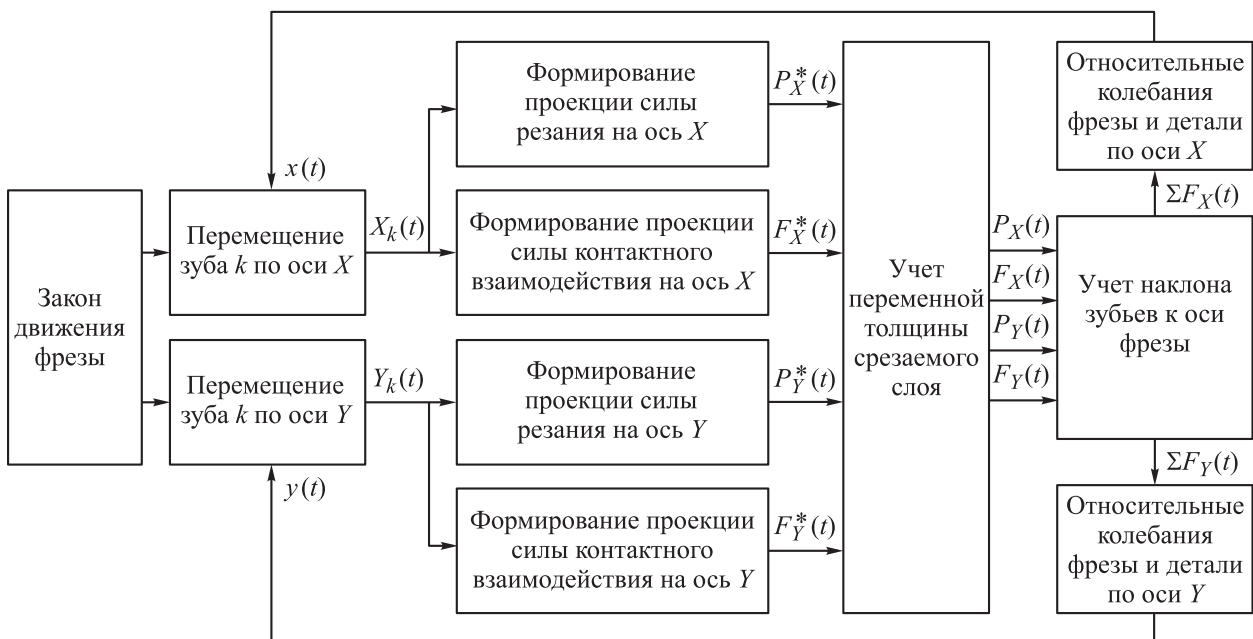


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели однозубого фрезерования с двумя степенями свободы

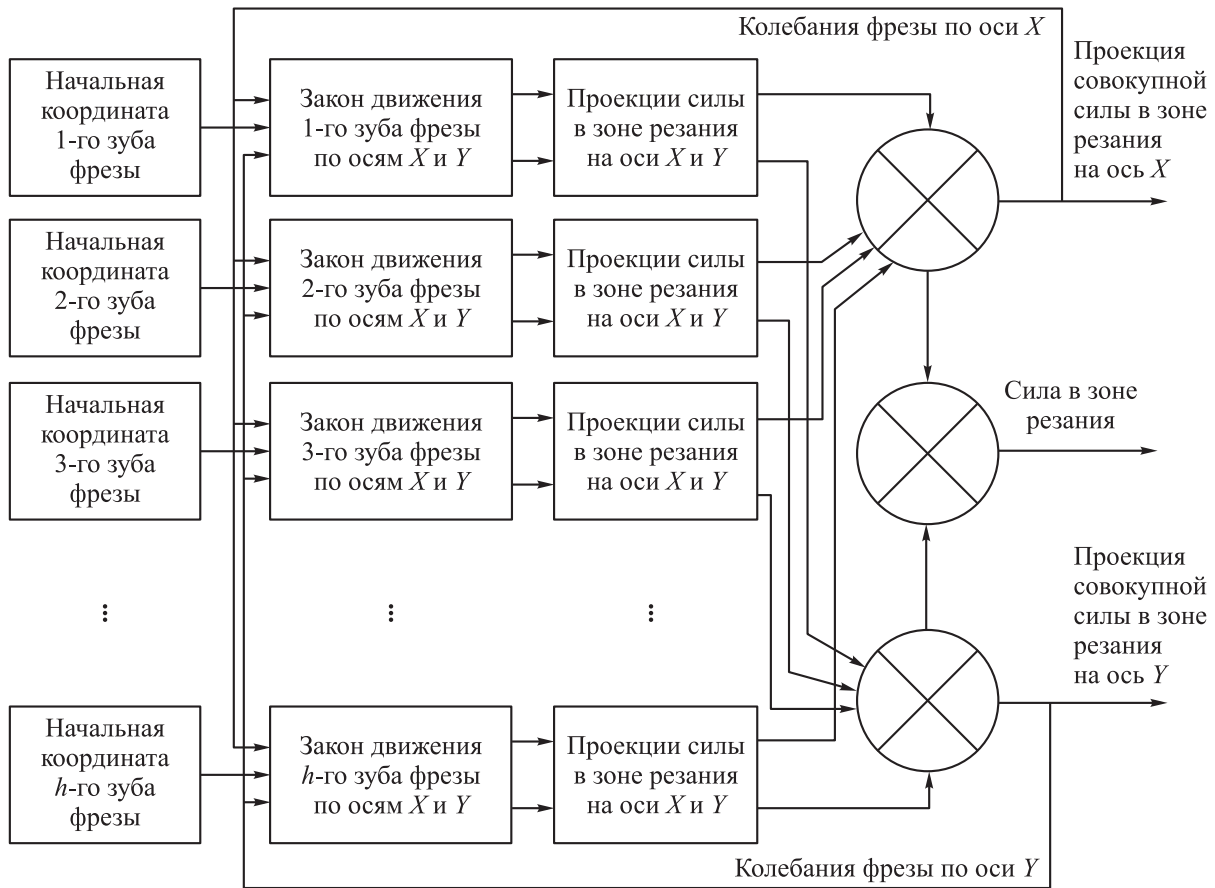


Рис. 4. Структурная схема модели многозубого фрезерования с n -м количеством зубьев фрезы

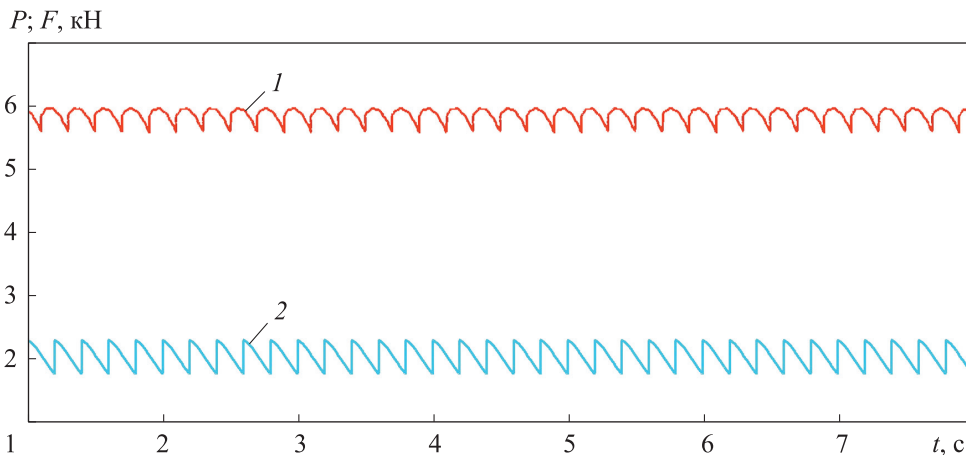


Рис. 5. Осциллограммы суммарных сил резания P (1) и контактного взаимодействия F (2), действующих в рабочей плоскости фрезерования при резании винтовой фрезой с пятью зубьями

фрезерования на возникающую ошибку движения РО, вызванную как деформационными процессами в зоне резания, так и ошибкой исполнения движения приводом подачи.

На практике около 90 % силы в зоне резания составляет сила $P(t)$ [18], поэтому далее будем рассматривать только ее влияние. На основании результатов, полученных в программной

среде MATLAB, построены графические зависимости амплитуды пульсаций силы резания ΔP (значения которой указаны в относительных единицах (о.е.) от параметров и режимов резания.

Зависимость амплитуды пульсаций силы резания ΔP от постоянной времени резания T_2 (рис. 6, а) характеризуется сложной формой и

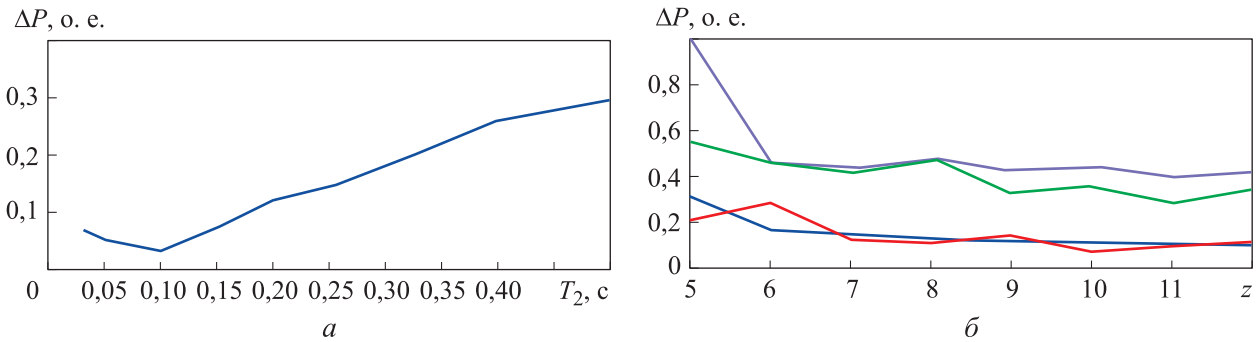


Рис. 6. Зависимости амплитуды пульсаций силы резания ΔP от параметров и режимов резания: а — постоянной времени резания T_2 ; б — числа зубьев фрезы z при угле контакта инструмента с заготовкой $\psi = 60$ (—), 90 (—), 120 (—) и 150° (—)

описывается полиномиальной функцией $y = 15,488x^4 - 22,892x^3 + 11,185x^2 - 1,4074x + 0,0964$. У этой зависимости есть два характерных участка. На первом участке происходит уменьшение пульсаций силы резания вследствие «сглаживания» функций силы резания отдельных зубьев фрезы.

Однако, начиная с некоторого значения постоянной времени резания T_2 , ее дальнейшее увеличение приводит к усилению амплитуды пульсаций силы резания из-за возникающего запаздывания. При цилиндрическом фрезеровании пульсации силы в зоне резания могут достигать 30 % среднего значения.

Зависимости амплитуды пульсаций силы резания ΔP от числа зубьев фрезы z при угле контакта инструмента с заготовкой $\psi = 60, 90, 120$ и 150° (рис. 6, б) показали, что с увеличением числа зубьев, одновременно участвующих в резании, пульсации силы резания уменьшаются.

Очевидно, что число одновременно участвующих в резании зубьев зависит от двух параметров: угла контакта фрезы с заготовкой ψ ($\psi = \varphi_{exit} - \varphi_{start}$) и общего числа зубьев фрезы z . Эта зависимость позволила установить, что

амплитуда колебаний силы резания может достигать 100 % среднего значения, если среднее (за период) количество зубьев, одновременно участвующих в резании, меньше одного. На практике это предотвращается применением фрез с винтовыми зубьями [17].

С помощью имитационной модели (см. рис. 3) в программной среде MATLAB исследовано влияние некоторых параметров режимов фрезерования (скорости вращения фрезы n и подачи на зуб s_z) на точность исполнения движения РО приводом подачи. Принято, что жесткость механической характеристики асинхронного электропривода $\beta_s = -10\,000$ Н·м·с.

Зависимость составляющих ошибки взаимного движения стола с заготовкой и режущего инструмента ε от скорости вращения фрезы приведена на рис. 7. Форма этой зависимости характеризуется пиками, соответствующими частотам, кратным собственной частоте режущего инструмента ω_0 . В области низких частот вращения фрезы n (до 10 Гц) ошибка движения имеет повышенные значения, вызванные большими пульсациями силы в зоне резания на этих скоростях.

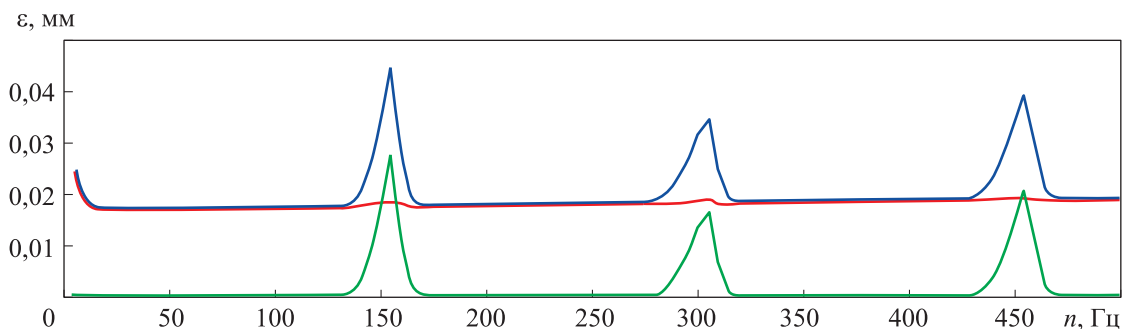


Рис. 7. Зависимость составляющих ошибки взаимного движения стола с заготовкой и режущего инструмента ε от скорости вращения фрезы n : — — общей ошибки; — — ошибки привода подачи; — — ошибки резания

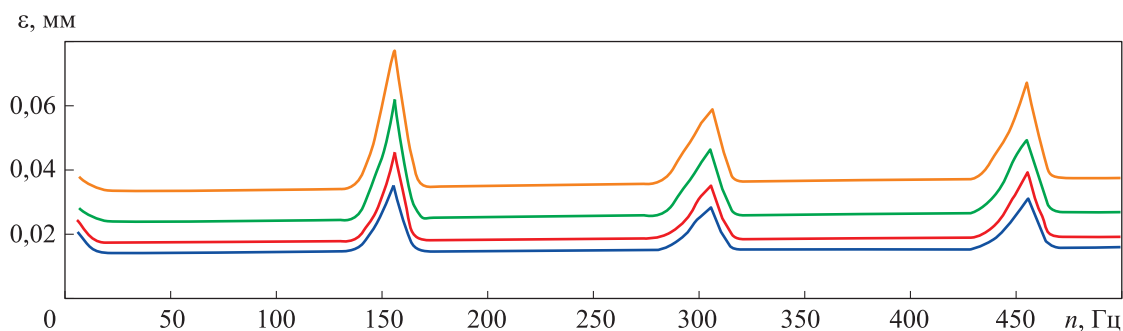


Рис. 8. Зависимость ошибки взаимного движения стола с заготовкой и режущего инструмента ε от скорости вращения фрезы n при подаче на зуб $s_z = 0,1$ (—), $0,2$ (—), $0,3$ (—) и $0,4$ мм/зуб (—)

Следует отметить, что ошибка позиционирования РО относительно фрезы ε преимущественно обусловлена ошибкой привода подачи, вызванной пульсациями силы в зоне резания. Вместе с тем, если частоты пульсаций близки или равны частоте $k\omega_0$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), то значительно увеличивается влияние явления резонанса на ошибку относительного движения. При этом составляющая ошибки, связанная с деформационными процессами заготовки и фрезы, существенно возрастает.

Зависимость ошибки взаимного движения стола с заготовкой и режущего инструмента ε от скорости вращения фрезы и подачи на зуб приведена на рис. 8. Как следует из полученных графиков, с повышением подачи на зуб растут и составляющие ошибок движения, причем до $s_z = 0,2$ мм/зуб эта зависимость имеет нелинейный характер, а при $s_z > 0,2$ мм/зуб ошибка равномерно увеличивается с ростом подачи на зуб.

Проведенное исследование показало, что при цилиндрическом и торцевом фрезеровании могут возникать существенные пульсации силы в зоне резания, способные вызвать серьезные колебания скорости вращения электропривода, приводящие к увеличению ошибки позиционирования стола с заготовкой и росту шероховатости поверхности детали, а нелинейные характеристики существенно усложняют динамическое поведение системы инструмент — деталь. Ошибка движения, вызванная действием переменной силы резания на привод подачи, при изменении частоты ее пульсаций изменяется незначительно, но существенно зависит от значения подачи на зуб.

Оценка влияния пульсаций момента нагрузки на скорость приводов подачи. Как уже от-

мечалось, во фрезерном станке кинематически связанные с зоной резания приводы испытывают влияние переменной нагрузки. Кинематические цепи современных металлорежущих станков обладают высокой жесткостью элементов и соединений $((5 \dots 100) \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м})$ и малым коэффициентом демпфирования $(0,01 \dots 0,10 \text{ Н} \cdot \text{с/м})$ [12, 19]. Следовательно, колебания в процессе распространения от зоны резания к приводным электродвигателям не претерпевают существенных изменений.

Приводы подачи посредством совместной работы осуществляют движение стола или инструмента в заданном направлении. Совокупная сила в зоне резания в большинстве случаев не совпадает с направлением подачи. Сила сопротивления движению, действующая на приводы подачи, определяется выражением

$$F_{\Pi} = F_{\Sigma} \cos \theta = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \cos \theta, \quad (11)$$

где θ — угол между направлениями подачи и совокупной силы в зоне резания F_{Σ} .

Момент сопротивления на валу электродвигателя привода подачи определяется из соотношения

$$M_c(t) = \frac{1}{2} di_{\Sigma} F_{\Pi}(t) + M_{c0}, \quad (12)$$

где i_{Σ} — суммарное передаточное число кинематической цепи привода подачи; M_{c0} — момент сопротивления холостого хода.

Если подача осуществляется посредством нескольких приводов, вызывающих движение исполнительного органа в ортогональных направлениях, то сила сопротивления движению будет распределена между этими приводами в зависимости от угла между направлениями подачи и движения привода (рис. 9).

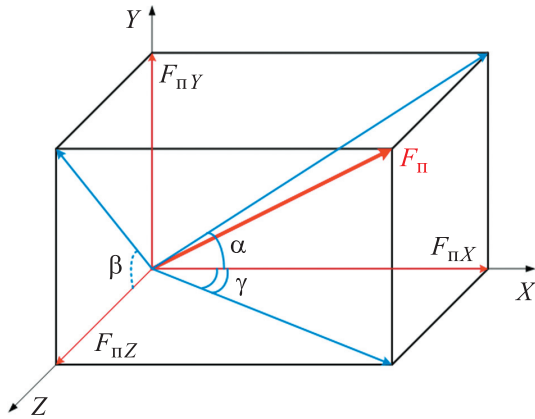


Рис. 9. Распределение сил сопротивления в системе с тремя ортогональными приводами подачи

Выражения для сил сопротивления, действующих на каждый из приводов подачи, зависят от углов α , β , γ (см. рис. 9) и общей силы сопротивления подачи F_n , вычисляемой по формуле (11). Эти силы создают моменты сопротивления, действующие на электродвигатели, по осям X , Y , Z :

$$\begin{cases} M_{cX} = \frac{1}{2} di_{\Sigma X} F_{nX} = \frac{1}{2} di_{\Sigma X} F_n \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \gamma}}; \\ M_{cY} = \frac{1}{2} di_{\Sigma Y} F_{nY} = \frac{1}{2} di_{\Sigma Y} F_n \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha + \operatorname{ctg}^2 \beta}}; \\ M_{cZ} = \frac{1}{2} di_{\Sigma Z} F_{nZ} = \frac{1}{2} di_{\Sigma Z} F_n \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta + \operatorname{ctg}^2 \gamma}}. \end{cases}$$

Следует отметить, что углы α , β и γ являются переменными величинами, следовательно, данный способ определения пульсаций момента применим лишь для случаев, когда направление силы в зоне резания не меняется во времени либо изменяется незначительно.

Скорость привода в зависимости от момента сопротивления будет изменяться по следующему закону для регулируемого электропривода:

$$\Omega(t) = \Omega_0 - \frac{M_c(t)}{\beta_3}, \quad (13)$$

где Ω_0 — скорость электродвигателя на холостом ходу.

Амплитуда относительных колебаний скорости (коэффициент неравномерности) электропривода (формула (1)) будет тем больше, чем меньше скорость вращения и выше момент сопротивления на валу. При этом пульсации момента сопротивления на валу привода пода-

чи связаны с пульсациями силы выражением, вытекающим из формулы (12):

$$\Delta M_c = \frac{1}{4} di_{\Sigma} \cos \theta (F_{\Sigma \max} - F_{\Sigma \min}), \quad (14)$$

где $F_{\Sigma \max}$ и $F_{\Sigma \min}$ — максимальное и минимальное значения силы F_n , действующей на привод.

После подстановки выражения (14) в формулу (13) получаем выражение для расчета пульсаций скорости привода подачи при работе одного привода подачи, совершающего движение под углом θ к направлению действия силы в зоне резания:

$$\Delta \Omega_{\delta} = \frac{\Delta M_c}{\beta_3} = \frac{1}{4\beta_3} di_{\Sigma} \cos \theta (F_{\Sigma \max} - F_{\Sigma \min}). \quad (15)$$

Аналогично соотношению (15) можно получить выражения для вычисления пульсаций скорости трех ортогональных приводов подачи. Приведем для примера выражение для оси X :

$$\Delta \Omega_{\delta} = \frac{1}{4\beta_3} di_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \gamma}} (F_{\Sigma \max} - F_{\Sigma \min}).$$

Выводы

1. Разработаны математические и имитационные модели, позволяющие установить связь между пульсациями силы в зоне резания при обработке металла фрезерованием и вызванными этими пульсациями колебаниями скорости вращения асинхронного электродвигателя в составе привода подачи.

2. Результаты исследования показали, что в асинхронных регулируемых электроприводах подачи фрезерных станков в области малых скоростей вращения пульсации момента сопротивления, обусловленные изменением силы резания по значению и направлению, могут вызывать недопустимо большие амплитуды колебаний скорости электропривода: до 30 % среднего значения при допустимой ошибке $s = 10$ %.

3. Выполнено исследование влияния параметров режимов резания на ошибку относительного движения стола с заготовкой и фрезы. Установлено, что ошибка движения, связанная с действием переменной силы резания на привод подачи, при изменении частоты ее пульсаций изменяется незначительно, но существенно зависит от значения подачи на зуб.

4. Возможным способом уменьшения пульсаций скорости электропривода подачи фрезерного станка является использование син-

хронных двигателей переменного тока или бесколлекторных электродвигателей, характеризующихся наибольшей жесткостью механической характеристики.

5. Полученные зависимости и оценки параметров режима позволяют формировать тре-

бования к мероприятиям по увеличению виброустойчивости электроприводов подачи металлорежущих фрезерных станков. Результаты исследований могут быть использованы проектировщиками электроприводов многокоординатных станков с ЧПУ.

Литература

- [1] Харченко А.О. *Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств*. Москва, ИНФРА-М, 2015. 260 с.
- [2] Черпаков Б.И., Альперович Т.А. *Металлорежущие станки*. Москва, Академия, 2003. 368 с.
- [3] Бушуев В.В., Кузовкин В.А., Молодцов В.В., Филатов В.В. Анализ погрешностей привода подачи металлорежущего станка и способов их снижения. *Измерительная техника*, 2006, № 6, с. 18–22.
- [4] Додонов В.В. Повышение точности обработки на станках с числовым программным управлением. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 6. URL: <http://www.engjournal.ru/catalog/mesc/tempp/1506.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2016-06-1506
- [5] Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. *Динамика управляемых машинных агрегатов*. Москва, Наука, 1984. 352 с.
- [6] Михайлов О.П. *Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов*. Москва, Машиностроение, 1990. 304 с.
- [7] Онищенко Г.Б. *Теория электропривода*. Москва, ИНФРА-М, 2015. 294 с.
- [8] Логоминов В.А. *Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов*. Дис. ... канд. техн. наук. Запорожье, 2013. 226 с.
- [9] Быкадор В.С., Костенко Г.Ю., Бабенко Т.С. Возникновение автоколебаний в простейшей системе резания металлов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2016, № 2, с. 119–123.
- [10] Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь). *Вестник Донского государственного технического университета*, 2011, № 3(54), с. 301–311.
- [11] Кудинов В.А. Динамические расчеты станков (основные положения). *СТИН*, 1995, № 8, с. 3–13.
- [12] Кудинов В.А. *Динамика станков*. Москва, Машиностроение, 1967. 360 с.
- [13] Соколовский А.П. *Жесткость в технологии машиностроения*. Москва-Ленинград, Машгиз, 1946. 207 с.
- [14] Заковоротный В.Л., Блохин В.П., Алексейчик М.И. *Введение в динамику трибосистем*. Ростов-на-Дону, ИнфоСервис, 2004. 680 с.
- [15] Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Быкадор В.С. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 2014, № 3, с. 26–39, doi: 10.18500/0869-6632-2014-22-3-26-39
- [16] Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С. Анализ вибраций, возникающих в процессе фрезерования. *Вестник научно-технического развития*, 2019, № 3, с. 12–23, doi: 10.18411/vntr2019-139-2
- [17] Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. *Металлорежущие инструменты*. Томск, Изд-во Том. ун-та, 2003. 392 с.
- [18] Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1975. 344 с.
- [19] Глусты И. *Автоколебания в металлорежущих станках*. Москва, Машгиз, 1956. 395 с.

References

- [1] Kharchenko A.O. *Metalloobratyvyayushchiye stanki i oborudovaniye mashinostroitel'nykh proizvodstv* [Metalworking machinery and equipment for machine-building industries]. Moscow, INFRA-M publ., 2015. 260 p.
- [2] Cherpakov B.I., Al'perovich T.A. *Metallorzhushchiye stanki* [Metal cutting machines]. Moscow, Akademiya publ., 2003. 368 p.
- [3] Bushuev V.V., Kuzovkin V.A., Molodtsov V.V., Filatov V.V. Analysis of metal cutting feed drives error and theirs reduction methods. *Measurement Techniques*, 2006, no. 6, pp. 18–22 (in Russ.).
- [4] Dodonov V.V. Working accuracy enhancement for machine tools with digital programming control. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 6 (in Russ.). Available at: <http://www.engjournal.ru/catalog/mesc/tempp/1506.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2016-06-1506
- [5] Veyts V.L., Kolovskiy M.3., Kochura A.E. *Dinamika upravlyayemykh mashinnykh agregatov* [Dynamics of controlled machine units]. Moscow, Nauka publ., 1984. 352 p.
- [6] Mikhaylov O.P. *Avtomatizirovannyi elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machine tools and industrial robots]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1990. 304 p.
- [7] Onishchenko G.B. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, INFRA-M publ., 2015. 294 p.
- [8] Logominov V.A. *Formirovaniye sherokhovatosti obrabotannoy poverkhnosti pri kontsevom tsilindricheskom frezerovanii tonkostennykh elementov detaley*. Kand. Diss. [Formation of roughness of the machined surface during end cylindrical milling of thin-walled elements of parts. Cand. Diss.]. Zaporozh'ye, 2013. 226 p.
- [9] Bykador V.S., Kostenko G.Yu., Babenko T.S. An occurrence of a self-oscillation in simple cutting system. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 119–123 (in Russ.).
- [10] Zakovorotnyy V.L., Fam D.T., Nguyen S.T., Ryzhkin M.N. Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling). *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 3(54), pp. 301–311 (in Russ.).
- [11] Kudinov V.A. Dynamic machine calculations (basic principles). *STIN*, 1995, no. 8, pp. 3–13 (in Russ.).
- [12] Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Machine dynamics]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1967. 360 p.
- [13] Sokolovskiy A.P. *Zhestkost' v tekhnologii mashinostroyeniya* [Rigidity in mechanical engineering technology]. Moscow-Leningrad, Mashgiz publ., 1946. 207 p.
- [14] Zakovorotnyy V.L., Blokhin V.P., Alekseychik M.I. *Vvedeniye v dinamiku tribosistem* [Introduction to the dynamics of tribosystems]. Rostov-na-Donu, InfoServis publ., 2004. 680 p.
- [15] Zakovorotnyy V.L., Fam D.T., Bykador V.S. Self-Organization and bifurcations of dynamical metal cutting system. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2014, no. 3, pp. 26–39 (in Russ.), doi: 10.18500/0869-6632-2014-22-3-26-39
- [16] Ermolayev A.I., Erofeev V.I., Plekhov A.S. Analysis of vibrations arising in the milling process. *Bulletin of Science and Technical Development*, 2019, no. 3, pp. 12–23 (in Russ.), doi: 10.18411/vntr2019-139-2
- [17] Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Metallorzhushchiye instrumenty* [Metal cutting tools]. Tomsk, TSU publ., 2003. 392 p.
- [18] Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Foundations of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1975. 344 p.
- [19] Tlusty I. *Avtokolebaniya v metallorzhushchikh stankakh* [Self-oscillation in machine tools]. Moscow, Mashgiz publ., 1956. 395 p.

Информация об авторах

ЕРМОЛАЕВ Артем Игоревич — младший научный сотрудник. Институт проблем машиностроения Российской академии наук (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: acidwolfvx@rambler.ru).

ЕРОФЕЕВ Владимир Иванович — доктор физико-математических наук, директор. Институт проблем машиностроения Российской академии наук (603024, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: erof.vi@yandex.ru).

ПЛЕХОВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и автоматизация научных исследований». Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д. 23, e-mail: aplehov@mail.ru).

Information about the authors

ERMOLAEV Artem Igorevich — Junior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinsky St., Bldg. 85, e-mail: acidwolfvx@rambler.ru).

EROFEEV Vladimir Ivanovich — Doctor of Science (Physics and Maths), Director. Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (603024, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Belinsky St., Bldg. 85, e-mail: erof.vi@yandex.ru).

PLEKHOV Aleksandr Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Computer Science and Research Automation Department. Nizhny Novgorod State University named after Lobachevsky (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 23, e-mail: aplehov@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С. Влияние сил в зоне резания на движение привода подачи фрезерного станка. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 13–25, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-13-25

Please cite this article in English as:

Ermolaev A.I., Erofeev V.I., Plekhov A.S. The Influence of Forces in the Cutting Zone on the Feed Drive Movement of a Milling Machine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 11, pp. 13–25, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-13-25



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебно-методическое пособие В. П. Леонова

«Абсорбционные холодильные машины»

Представлены описания абсорбционных холодильных машин. Рассмотрены области применения холодильных машин и их основные параметры, а также типы и конструктивные схемы холодильных машин, конструкции их основных аппаратов. Изложены методики расчета циклов холодильных машин и их основных аппаратов. Приведены описания выполнения домашних заданий, посвященных указанным расчетам.

Для студентов, изучающих дисциплину «Нетрадиционные холодильные установки».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru