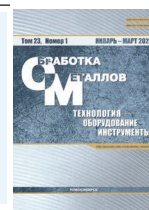




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках

Вилор Заковоротный ^а, Валерия Гвинджилия ^{б, *}

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 08 ноября 2020
 Рецензирование: 05 декабря 2020
 Принята к печати: 06 января 2021
 Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Минимизация приведенных затрат на изготовление
 Качество изготовления деталей
 Координаты переключения циклов обработки

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ: «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 19-08-00022; «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации приведенных затрат на изготовление», № 20-38-90074.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из направлений повышения эффективности обработки на станках является согласование программы ЧПУ с изменяющимися свойствами динамической системы резания. Если при этом учитывается износ инструмента и связанные с ним изменения параметров динамической системы резания, то скорость резания для обеспечения минимального значения интенсивности изнашивания уменьшается по пути резания. Соответствующая скорость подачи уменьшается еще быстрее, так как необходимо обеспечивать постоянство деформационных смещений инструмента относительно заготовки. Эволюция свойств процесса резания, для согласования с которыми выполняется коррекция траекторий исполнительных элементов станка, зависит от мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. При этом уменьшается эффективность обработки. Поэтому формулируется новая для рассматриваемой предметной области проблема определения координат перемещения инструмента относительно заготовки, начиная с которых дальнейшая обработка экономически нецелесообразна. В этом случае необходимо после обработки очередной детали обеспечить замену инструмента и выполнить его переналадку. **Предмет.** Металлорежущий станок токарной группы, траектории исполнительных элементов которого управляются, например, системой ЧПУ. **Цель работы.** Математическое моделирование и методика определения координат, при которых необходимо делать замену инструмента. **Метод и методология проведения работы.** Доказаны необходимые условия оптимальности определения этих координат. Приводится математический инструментальный, позволяющий по заданным траекториям вычислить координаты, при которых приведенные затраты на изготовление принимают минимальное значение. При этом учитываются вероятностные характеристики эволюционных траекторий. **Результаты и обсуждения.** Приводится анализ эффективности использования методики в промышленности в зависимости от стоимости затрат на станок и инструмент вместе с его заменой и переналадкой. Доказанные условия оптимальности и приведенный математический инструментальный дополняют знания об оптимизации управляемых процессов обработки на станках. **Выводы.** Результаты исследования показывают новые варианты организации замены инструментов, направленные на повышение эффективности обработки программными методами с помощью системы ЧПУ.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 56–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67.

Введение

После опубликования работ [1, 2] многие проблемы динамики систем различной природы, взаимодействующих с различными средами, ста-

ли рассматриваться с учетом их эволюционных изменений и самоорганизации [3–7]. Показано, что при управлении сложными взаимосвязанными системами эффективно использовать синергетическое согласование внешнего управления с внутренней динамикой управляемой системы [3]. Применительно к обработке на станках – это согласование траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС) с динамической системой резания (ДСР) [8–10], свойства которой

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, аспирант
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7-918-583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

изменяются в зависимости от развития износа режущего инструмента и выделяемой мощности в зоне резания [8–14]. Принимаются во внимание два обстоятельства. Во-первых, свойства ДСР изменяются в зависимости от износа инструмента и подводимой к резанию энергии [8–10]; во-вторых, эволюционные изменения приводят не только к динамической перестройке свойств резания, но и изменяют технологические режимы, при которых интенсивность изнашивания инструмента минимальна. Изменяется и геометрическая топология поверхности детали. Эти изменения вытекают, прежде всего, из термодинамической природы изнашивания и зависимости скорости изнашивания от вводимой в зону резания энергии механической системы [18–24]. Такие особенности процесса резания привели к созданию различного класса систем управления процессом обработки на металлорежущих станках [25–34]. Например, если опираться при выборе оптимальной скорости резания на существование оптимальной температуры в зоне контакта граней инструмента с заготовкой, то оптимальной температуре должна соответствовать оптимальная мощность потребляемой в зоне резания энергии. Тогда обеспечению оптимальной мощности по мере развития износа должно соответствовать монотонное уменьшение скорости резания. При этом для стабилизации упругих деформаций должна уменьшаться величина подачи, т. е. скорость подачи должна уменьшаться еще быстрее по пути резания [8–10]. Уменьшение ТИЭС по пути резания

приводит к тому, что дальнейшая обработка на малых скоростях резания и подачах становится нецелесообразной. Поэтому формулируется новая задача определения координат, в которых необходимо делать замену инструмента – проблема, близкая синтезу систем оптимального быстрогодействия, которая решается, например, на основе использования принципа максимума Л. Понтрягина [35, 36]. Подобная задача решалась авторами применительно к сверлению глубоких отверстий малого диаметра [37]. Однако в случае обработки она имеет особенности, рассмотрению которых посвящена статья. Целью статьи является разработка математических алгоритмов и методик, позволяющих определить эти координаты.

Методика исследований

Математическая формулировка

Ограничимся рассмотрением продольного точения на станках токарной группы. Приведенные результаты легко обобщаются на другие виды обработки: фрезерование, сверление, в том числе сверление глубоких отверстий [37]. Пусть заданы: общий путь движения вершины инструмента L , который определяется суммой (рис. 1)

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} l_i. \quad (1)$$

Путь L эквивалентен партии деталей. Поставим задачу определения координат $l^{(i)}$

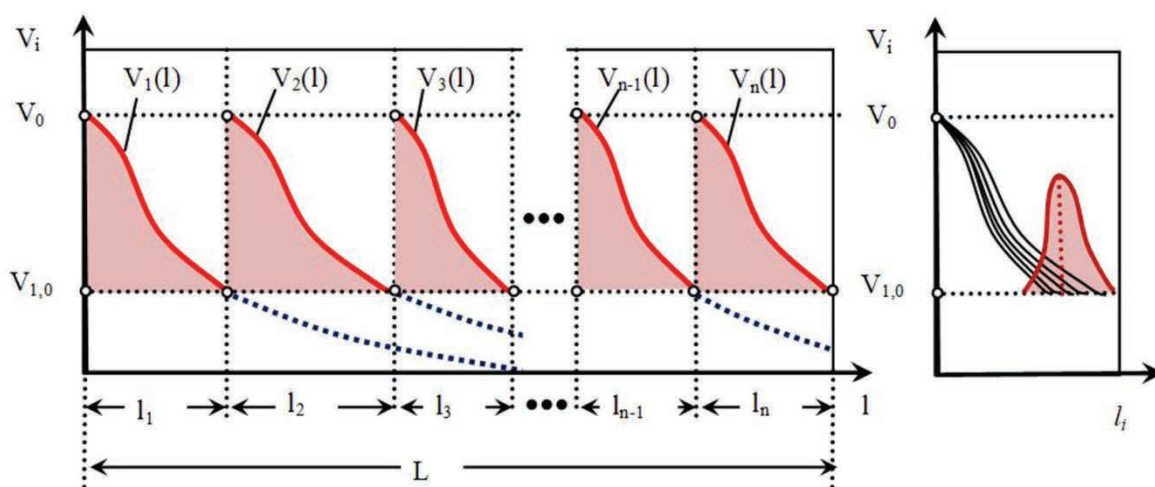


Рис. 1. Схема определения координат переключения циклов обработки

Fig. 1. Scheme for determining the coordinates of processing switching cycles

вдоль траектории перемещения инструмента L ($l^{(1)} = l_1$, $l^{(2)} = l_1 + l_2$, $l^{(3)} = l_1 + l_2 + l_3$, ..., $l^{(n-1)} = L - l_n$), при которых затраты на изготовление партии деталей минимальны. Они определяются суммой затрат на собственно резание и на замену инструмента и его переналадку. При этом заданы траектории скорости по пути $V_i(l)$, изменяющиеся в зависимости от текущего износа инструмента. Начальное значение скорости $V_0 = \text{const}$. Траектория скорости резания $V_p^{(i)}(l_i)$ по пути вычислена таким образом, что интенсивность изнашивания инструмента является минимальной [10]. Методика вычисления базируется на гипотезе о связи интенсивности изнашивания с мощностью необратимых преобразований энергии. Оптимальной мощности соответствует оптимальная температура – это область перехода от преобладающего адгезионного к диффузионному изнашиванию инструмента [7, 24]. Скорости $V_p^{(i)}(l_i)$ соответствует скорость подачи $V_i(l)$, которая ограничена сверху предельным значением, влияющей на формируемую резанием шероховатость поверхности. Однако в ходе эволюции за счет износа инструмента и связанного с ним увеличения объема пластической деформации в зоне резания величину подачи необходимо уменьшать. Поэтому траектория скорости подачи по пути резания уменьшается быстрее траектории скорости резания [10].

При заданных скоростях $V_i(l)$ затраты Z на обработку определяются по формуле

$$Z = Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = c_1 \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^{l_i} \frac{d\xi}{V_i(\xi)} + (n-1)c_2, \quad (2)$$

где c_1 – стоимость станкоминутой в [руб/мин]; c_2 – стоимость замены инструмента вместе с его настройкой. Аналогичную структуру стоимости имеет сверление глубоких отверстий малого диаметра спиральными сверлами, но в этом случае переключению цикла обработки соответствуют затраты на вывод инструмента из зоны резания для его очистки от стружки [37].

Решение задачи сводится к вычислению l_i , при которых $Z \Rightarrow \min$.

Необходимые условия оптимальности Алгоритм вычисления

Скорость в силу указанных выше обстоятельств является монотонно убывающей функцией. Покажем, что в этом случае оптимальным координатам переключения циклов соответствуют равные между собой скорости резания. Причем эти скорости равны при различных монотонно изменяющихся функциях $V_i(l_i) \in \mathbb{S}_0$. Множество $\mathbb{S}_0$ является множеством фазовых траекторий скоростей, при которых одновременно выполняется условие минимума интенсивности изнашивания и обеспечения заданного качества изготовления детали.

При решении задачи вначале зафиксируем количество переключений n и для заданных n и L определим координаты переключений, при которых в (2) $Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = \min$ при условии, что дополнительно выполняется требование (1). Очевидно, если при определении оптимальных координат не накладывать условия (1) и не зафиксировать n , то задача не имеет смысла. Если зафиксировать $Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = Z_i$, то полученная поверхность может пересекаться гиперплоскостью $L(l_1, l_2, \dots, l_n) = \sum_{i=1}^{i=n} l_i$ (рис. 2).

Если уменьшать Z_i , то линии пересечения поверхности $Z_i(l_1, l_2, \dots, l_n)$ с гиперплоскостью представляют выпуклые замкнутые траектории, которые вырождаются в точку $Z_0(l_1, l_2, \dots, l_n)$, которой соответствуют искомые координаты. Причем поверхности $Z_i(l_1, l_2, \dots, l_n)$ являются выпуклыми, так как по мере развития износа функция изменения скорости является монотонно убывающей. Следовательно, единственной оптимальной точкой, в которой выполняется условие $Z \Rightarrow \min$, является условие касания гиперповерхности $Z(l_1, l_2, \dots, l_n)$ и гиперплоскости $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ (рис. 2). Следовательно, для этой точки $Z_0(l_1, l_2, \dots, l_n)$ справедливо

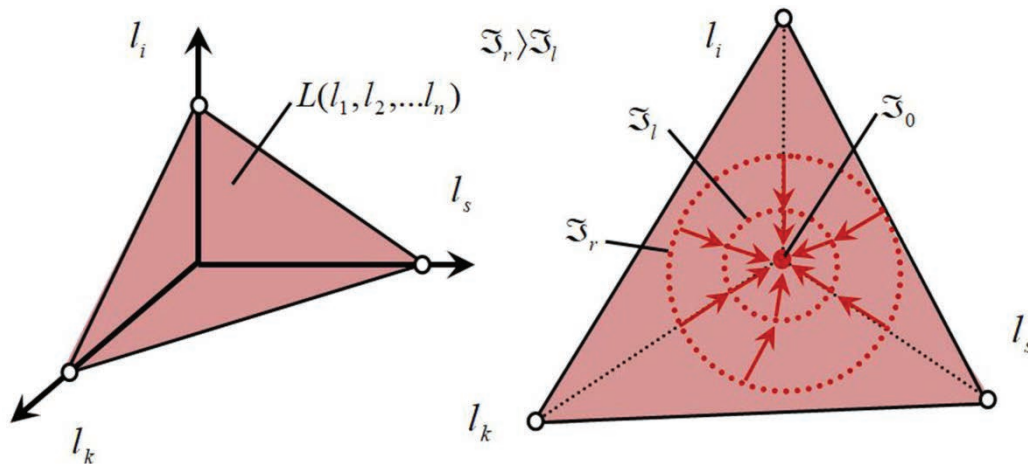


Рис. 2. Схема, поясняющая пересечение гиперплоскости $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ и гиперповерхности $\mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n)$

Fig. 2. Diagram explaining the intersection of a hyperplane $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ and a hypersurface $\mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n)$

$$\begin{aligned} \partial \mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n) / \partial l_i &\equiv \\ &\equiv \partial L(l_1, l_2, \dots, l_n) / \partial l_i, \end{aligned} \quad (3)$$

откуда сразу получаем

$$V_i(l_i) = V_s(l_s), \quad i, s \Rightarrow 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4)$$

Условие (4) позволяет упростить вычисление координат, а также физически реализовать систему, обеспечивающую условие $3 \Rightarrow \min$. Причем это условие принимает во внимание физические и экономические требования к оптимальности. Условие оптимальности будет достаточным, если дополнительно из (2) определить n , при котором $3 \Rightarrow \min$. Ранее в [10] предложена аппроксимация изменения скорости по пути резания в виде экспоненциальной функции

$$\begin{aligned} V^{(i)}(l_i) &= V_0 \exp[-\alpha_i l_i], \\ l_i &\in \left(0, \frac{4}{\alpha_i}\right), \quad V^{(i)}(l_i) \in \mathbb{N}_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_0 – начальное значение скорости в [м/с]; α_i – параметр в [м⁻¹]. В дальнейшем, не нарушая общности, будем считать аппроксимацию (5) справедливой.

В работах [8–10] было показано, что траектории (5), определяемые эволюционными свойствами системы, являются чувствительными к малым вариациям исходных параметров и к не-

управляемым возмущениям, например биениям. Поэтому при неизменной начальной скорости V_0

параметр α_i может варьироваться. Его естественно рассматривать в виде гауссовой случайной величины с математическим ожиданием $M[\alpha_i] = \hat{\alpha}$ и дисперсией σ_α . Тогда по математическому ожиданию $\hat{\mathfrak{Z}}(n)$ для (2) с учетом (5) имеем зависимость приведенных затрат на изготовление партии деталей от количества переключений n :

$$\begin{aligned} \hat{\mathfrak{Z}}(n) = \hat{\mathfrak{Z}}(n) &= \frac{c_1}{V_0 \hat{\alpha}} \left[\exp\left(\hat{\alpha} \frac{L}{n}\right) - 1 \right] + \\ &+ (n-1) c_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Очевидно, что (6) при варьировании n имеет минимум, которому соответствует оптимальная минимальная скорость $V_{0,1} = V_0 \exp\left(-\frac{\hat{\alpha} L}{n_0}\right)$.

Здесь n_0 – количество переключений, доставляющее минимум (6). Если учесть доказанное необходимое условие оптимальности (4), то из (6) вычисляется оптимальное значение n_0 и соот-

ветствующая оптимальная скорость $V_{0,1}$. Затем вычисляются l_i , соответствующие $\alpha_i \in (\hat{\alpha} - 3\sigma_\alpha, \hat{\alpha} + 3\sigma_\alpha)$, которые характеризуют множество $\mathbb{N}^{(1)}$.

Они определяются по очевидной зависимости

$$l_i = -\frac{1}{l_i} \ln \left(\frac{V_{0,1}}{V_0} \right), \quad V_{0,1} < V_0. \quad \text{Причем} \quad \text{всем} \quad l_i \in \mathbb{N}^{(0)}$$

соответствуют скорости $V_{0,1} = \text{const}$.

Результаты и их обсуждение

Пример определения оптимальных координат переналадки инструмента

Приведем пример эффективности методики выбора траекторий скорости и переключений циклов обработки для продольного точения вала $D = 8,0$ мм из стали 08X15H24B4TP неперетачиваемыми пластинами фирмы SANDVIK Coromant из твердого сплава GC2015, форма пластины – «W». Глубина резания $t_p^{(0)} = 2,0$ мм; начальная подача $S_p^{(0)} = 0,1$ мм / об; начальная скорость резания $V_0 = 1,2$ м / с. Длина вдоль оси 38,0 мм, путь резания одной детали 9,5 м, общий путь $L = 840$ м. Математическое ожидание пути резания до критического износа 0,8 мм при неизменных оптимальных режимах резания 20 м. Параметры α , характеризующие эволюцию: $\hat{\alpha}_1 = 0,1 \text{ м}^{-1}$, $\hat{\alpha}_2 = 0,01 \text{ м}^{-1}$. Величина дисперсии этого параметра: $\sigma_i = 0,1 \hat{\alpha}_i$. Параметры стоимости c_1 , c_2 приняты в условных единицах стоимости к единице времени. Для этого случая на рис. 3 показаны зависимости стоимостной эффективности от числа переключений n . Здесь красными кругами и пунктирной линией выделены оптимальные значения числа переключений в зависимости от стоимости замены и переналадки инструмента $c_2 = sc_1$.

В любой реальной системе обычно выполняется условие $c_2 > c_1$, так как в c_2 входит стоимость эксплуатации станка. Если $c_2 = 0$, то оптимальным является $n \rightarrow \infty$. Тогда затраты приближаются к своему предельному минимальному значению Z_0 (показано синим цветом), определяемому гипотетическим случаем обработки изнашиваемым инструментом на постоянных режимах: $S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм / об} = \text{const}$, $V_0 = 1,2 \text{ м / с}$. Оптимальные значения числа переключений зависят также от параметров $\hat{\alpha}$, характеризую-

щего изменение интенсивности изнашивания по пути резания. Как показано ранее [10], параметр $\hat{\alpha}$, являющийся интегральной оценкой эволюционных свойств процесса резания, зависит от динамических свойств этого процесса, в том числе от формируемых аттракторов деформационных смещений инструмента относительно заготовки. Они изменяются в ходе развития износа инструмента.

При анализе, как правило, n является не целым, поэтому оптимальное количество переключений естественно взять в виде ближайшего целого значения. Кроме этого необходимо дополнительно согласовать путь, соответствующий переключению, с длиной перемещения вершины инструмента при обработке конкретной детали. Приведенный пример иллюстрирует оптимизацию переключения циклов обработки для случая, когда параметры эволюционных траекторий изменения режимов постоянны и соответствуют математическим ожиданиям $\hat{\alpha}$. Так как в реальной системе $\alpha_i \in (\hat{\alpha} - 3\sigma_\alpha, \hat{\alpha} + 3\sigma_\alpha)$, то случайным распределением характеризуется и множество $l_i \in \mathbb{N}^{(0)}$. На рис. 4 $a = V_{1,0}(\hat{\alpha} - \sigma_\alpha)$, $b = V_{1,0}(\hat{\alpha})$, $c = V_{1,0}(\hat{\alpha} + \sigma_\alpha)$. Согласно доказанному положению (3) и (4) всем координатам l_i , обеспечивающим минимум затрат на изготовление партии деталей, соответствуют постоянные скорости $V_{1,0}$, при которых необходимо выполнять замену инструмента (рис. 4). Поэтому замену инструментов необходимо осуществлять не в координатах перемещения, а в их скоростях $V_{1,0} = \text{const}$.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время программы ЧПУ для обработки деталей остаются неизменными при обработке партии деталей независимо от развития износа инструмента. Развитие износа изменяют параметры динамической системы резания и, как следствие, изменяют ее свойства, влияющие на интенсивность изнашивания инструмента и параметры качества обрабатываемых деталей. Поэтому необходимо согласовать ТИЭС с эволюционно изменяющимися свойствами процесса резания. В этом случае ТИЭС определяются

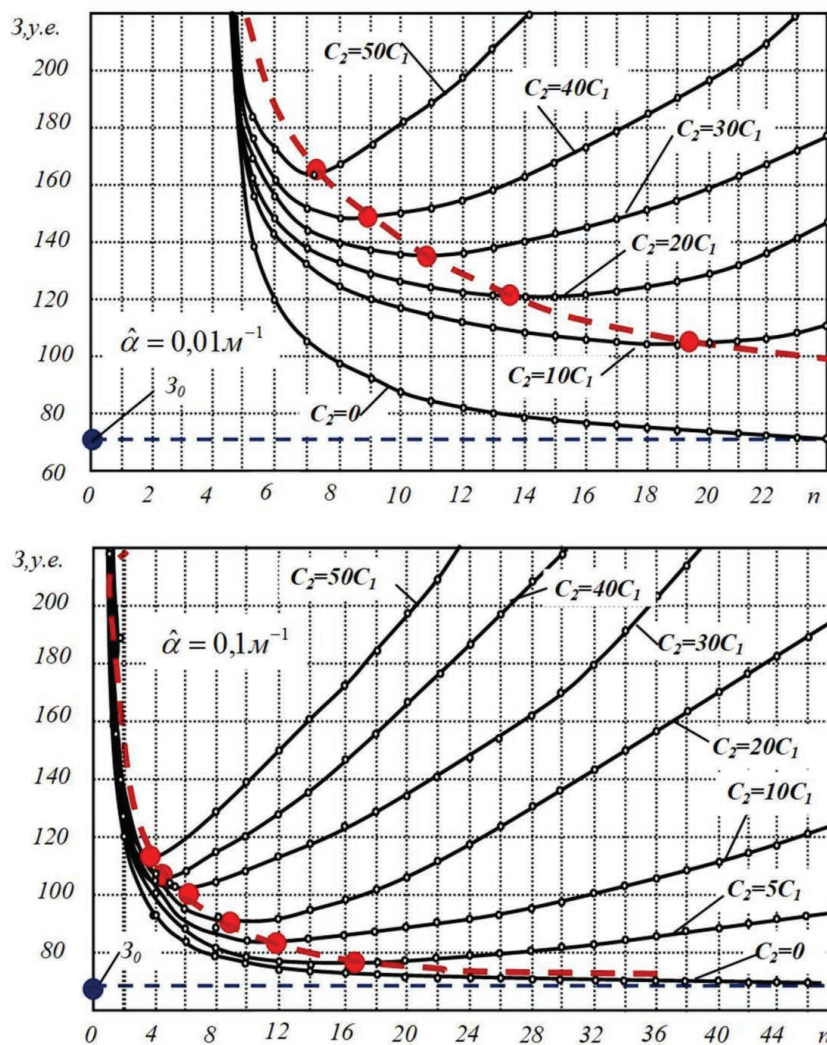


Рис. 3. Диаграммы изменения стоимости изготовления партии из ста деталей в условных единицах в зависимости от числа переключений циклов обработки

Fig. 3. Diagrams of changes in the cost of manufacturing a batch of one hundred parts depending on the number of processing switching cycles in conventional units

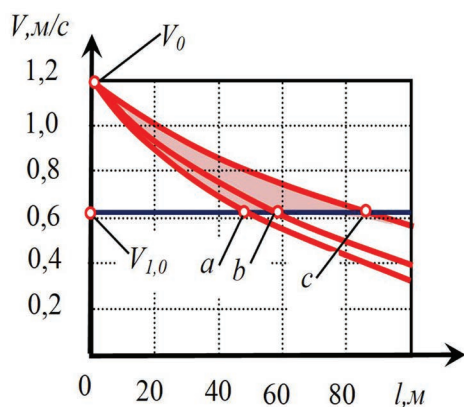


Рис. 4. Связь координат переключения с изменениями α

Fig. 4. The relationship of switching coordinates with the changes α

не на основе фиксированных значений технологических режимов, а на их траекториях, согласованных с эволюционно изменяющимися свойствами динамической системы резания. Такое согласование позволяет минимизировать интенсивность изнашивания инструмента при выпуске деталей требуемого качества. Оно приводит к необходимости уменьшения вектора скорости по направлению движения вершины инструмента. Таким образом, при неизменности упруго-диссипативных свойств подсистем инструмента и заготовки условию согласования соответствуют монотонные уменьшения как скорости резания, так и в еще большей степени скорости продольной подачи. Поэтому для обеспечения

экономической оптимальности процесса обработки формулируется новая для рассматриваемой предметной области задача определения таких координат переналадки инструментальной подсистемы, при которых затраты на изготовление партии деталей являются минимальными. Приведенный математический инструментарий, алгоритмы и доказанные необходимые условия оптимальности позволяют решать эту проблему.

Пример изменения оптимальных координат переналадки инструментальной подсистемы показал, что они зависят от соотношения стоимости станкоминуты станка во время собственно процесса резания и стоимости замены и переналадки режущего инструмента. При возрастании стоимости переключений уменьшается их число и возрастает путь резания в каждом цикле. На число переключений и путь резания оказывает влияние и интенсивность процесса деградации процесса обработки, которая характеризуется параметром α . На него влияют необратимые преобразования энергии в области сопряжения задней грани инструмента с заготовкой. Они зависят как от упруго-диссипативных свойств взаимодействующих через резание подсистем, эволюционно изменяющихся параметров формируемой резанием динамической связи, так и от неуправляемых возмущений, например, биений шпинделя. Причем, как показано нами ранее [8–10], траектории необратимых преобразований энергии по пути резания могут обладать высокой чувствительностью к малым вариациям параметров системы и к параметрам неуправляемых возмущений.

Разработанная методика апробирована в условиях ПАО Роствертол при точении вала штурцера гидросистемы вертолета МИ-29 из стали 08X15H24B4TP. Не останавливаясь на деталях, отметим следующие практические результаты. Вследствие использования согласованных с эволюцией ТИЭС, а также оптимальных алгоритмов переключения циклов обработки получены следующие практические результаты: количество обработанных деталей между переналадкой инструментальных систем по традиционной программе составило 3 детали, по адаптированной программе – 8 деталей; среднее машинное время на обработку одной детали увеличилось в 1,7 раза. Приведенные затраты при изготовлении партии из 100 деталей уменьшились в 1,3

раза. Важно отметить, что приведенная эффективность получена программными методами без изменения инструмента и условий обработки. Разработанная методика и математический инструментарий можно распространить на решение задач управления другими эволюционными процессами обработки [37].

Заключение

При создании программы ЧПУ с учетом согласования траекторий исполнительных элементов станка с эволюционными изменениями свойств процесса резания приходится считаться с тем, что скорость резания и соответствующая ей скорость подачи имеют тенденцию к снижению их значений по мере развития износа инструмента. Поэтому для эффективности обработки необходимо определить по пути резания координату, в которой следует осуществить замену инструмента. Эта координата выбирается из условия минимизации приведенных затрат на изготовление партии деталей. Для реализации выбора координаты предложено математическое моделирование процесса, доказаны необходимые условия оптимальности и приведена методика вычисления оптимальных координат, при которых необходимо осуществить замену инструмента. Показано, что оптимальным координатам переключения соответствуют равные между собой минимальные скорости резания по направлению движения вершины инструмента. Они зависят от соотношения стоимостей машинного времени и стоимости замены инструментов (стоимости переключения циклов обработки). Приведены результаты численного моделирования и промышленной апробации разработанных алгоритмов, показывающие, что без изменения свойств инструментов, состояния станков и прочее только программными методами можно увеличить стоимостную эффективность обработки в 1,2–1,3 раза.

Список литературы

1. Haken H. Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 258 p. – ISBN 978-3-540-33021-9. – DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
2. Prigogine I., George C. The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems // Proceedings of the



National Academy of Sciences of the United States of America. – 1983. – Vol. 80. – P. 4590–4594.

3. Колесников А.А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза. – Таганрог: ЮФУ, 2007. – 384 с.

4. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Угнич Е.А. Модель управления современным предприятием на основе системно-синергетического подхода // Экономическая наука современной России. – 2016. – № 4 (75). – С. 112–128.

5. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.

6. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. – Ростов н/Д.: Донской гос. техн. ун-т, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.

7. Мигранов М.Ш. Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–71.

8. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

9. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, N 5. – P. 423–430. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

10. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

11. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

12. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear // Encyclopedia of Tribology. – Boston, MA: Springer, 2013. – P. 3622–3636. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.

13. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 30 (8). – P. 958–963. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.

14. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes // Computers and Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50, N 12. – P. 15–34. – DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.

15. Каримов И.Г. Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 44 (49). – С. 85–89.

16. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction / J.R. Gomez-Solano, C. July, J. Mehl, C. Bechinger // New Journal of Physics. – 2015. – Vol. 17. – P. 045026. – DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.

17. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach // Tribology in Industry. – 2014. – Vol. 36, N 4. – P. 341–347.

18. Патент 2538750 Российская Федерация. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки / М.П. Козочкин, С.В. Федоров, М.В. Терешин – № 2013123625/02; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2015.

19. Зариктуев В.Ц. Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 14–19.

20. Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M. Experimental study on the high speed machining of hardened steel // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 291–295. – DOI: 10.1016/j.pro-eng.2014.02.234.

21. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting / P. Blau, K. Busch, M. Dix, C. Hochmuth, A. Stoll, R. Wertheim // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 26. – P. 361–366. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.

22. Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y. The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining // Strojnicki Vestnik = Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 52 (2). – P. 124–134. – DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.

23. Kant G., Sangwan K.S. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 83. – P. 151–164. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.

24. Рыжкин А.А. Синергетические аспекты управления износостойкостью инструментальных режущих материалов // Динамика технических систем: XII международная научно-техническая конференция: сборник трудов. – Ростов н/Д., 2016. – С. 9–10.

25. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Тимирязев В.А. Адаптивное управление технологическими процессами на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

26. Базров Б.М. Повышение эффективности механической обработки деталей с помощью систем адаптивного управления. – М.: ЦНИИТЕИлегпищемаш, 1976. – 67 с.
27. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Новейшие тенденции в области архитектурных решений систем ЧПУ // Автоматизация в промышленности. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
28. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 241–246. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.755.
29. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear / T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Kłodowski, D.Y. Pimenov // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 88. – P. 100–110. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.11.026.
30. Martinov G.M., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Collecting diagnostic operational data from CNC machines during operation process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, N 3. – P. 033051. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033051.
31. Martinov G., Martinova L., Ljubimov A. From classic CNC systems to cloud-based technology and back // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 63. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.
32. Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R. Approach in implementing of logical task for numerical control on basis of concept “Industry 4.0” // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Moscow, Russia, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728584.
33. Kozlov A.M., Malyutin G.E., Handozhko A.V. Performance increase of precision volumetric milling on machines based on frame-accurate control // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1111–1119. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.603.
34. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal / H. Arslan, A.O. Er, S. Orhan, E. Aslan // International Journal of Acoustics and Vibration. – 2016. – Vol. 21, N 4. – P. 371–378. – DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.
35. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
36. Болтянский В.Г. Моделирование линейных оптимальных быстрых действий при помощи релейных схем // Доклады Академии наук СССР. – 1961. – Т. 139, № 2. – С. 275–278.
37. Zakovorotny V.L., Bordatchev E.V., Sanekar T.S. Variational formulation for optimal multi-cycle deep drilling of small holes // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. – 1997. – Vol. 119, N 3. – P. 553–560. – DOI: 10.1115/1.2801293.

Конфликт интересов

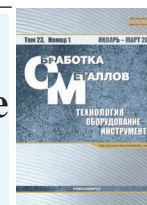
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 November 2020

Revised: 05 December 2020

Accepted: 06 January 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Minimization of the above cost of manufacture

Quality of parts manufacturing

The coordinates of the switching cycles

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research projects: "Development of the theory of analysis and synthesis of controlled self-organization in a dynamic cutting system during processing on the example of manufacturing parts on lathes", No. 19-08-00022; "Development of methods for analysis and synthesis of a dynamic cutting system based on the criterion of minimizing the reduced manufacturing costs", No. 20-38-90074.

ABSTRACT

Introduction. One of the ways to improve the efficiency of processing on machines is to coordinate the CNC program with the changing properties of the dynamic cutting system. If this takes into account the tool wear and the associated with it changes in the parameters of the dynamic cutting system, then the cutting speed to ensure the minimum wear rate is reduced along the cutting path. The corresponding feed rate is reduced even faster, since it is necessary to ensure a constant deformation displacement of the tool relative to the workpiece. The evolution of the properties of the cutting process (for matching with which the trajectories of the operating elements of the machine are corrected) depends on the power of irreversible transformations of the energy supplied to cutting. This reduces the processing efficiency. Therefore, a new for the considered subject area problem of determining the coordinates of the tool movement relative to the workpiece is formulated, starting from which further processing is economically inexpedient. In this case, it is necessary, after processing the next part, to ensure the replacement of the tool and carry out its changeover. **Subject.** A metal-cutting machine of a turning group, the trajectories of the executive elements of which are controlled, for example, by a CNC system. **The purpose of the work.** Mathematical simulation and methods for determining the coordinates at which it is necessary to replace the tool. **Method and methodology.** The necessary conditions for the optimality of determining these coordinates are proved. Mathematical tools are provided that allow calculating the coordinates at which the given manufacturing costs take the minimum value according to the given trajectories. The probabilistic characteristics of evolutionary trajectories are taken into account. **Results and discussions.** The analysis of the efficiency of using the technique in industry depending on the cost of the machine and tool together with its replacement and readjustment is given. The proven optimality conditions and the given mathematical tools complement the knowledge about the optimization of controlled machining processes on machines. **Conclusions.** The results of the study show new options for the organization of tool replacement, aimed at improving the efficiency of processing by software methods using a CNC system.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 56–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67. (In Russian).

References

1. Haken H. *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 258 p. ISBN 978-3-540-33021-9. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
2. Prigogine I., George C. The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, vol. 80, pp. 4590–4594.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Post-graduate Student

Don State Technical University,

1 Gagarin square,

344000, Rostov-on-Don, Russian Federation

Tel.: +7-918-583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

3. Kolesnikov A.A. *Prikladnaya sinergetika: osnovy sistemnogo sinteza* [Applied synergetics: fundamentals of system synthesis]. Taganrog, SFU Publ., 2007. 384 p.
4. Zakovorotny V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Model' upravleniya sovremennym predpriyatiem na osnove sistemno-sinergeticheskogo podkhoda [Model of the modern enterprise management on the basis of system-synergistic approach]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoi Rossii = Economic of Contemporary Russia*, 2016, no. 4 (75), pp. 112–128.
5. Zakovorotny V.L., Shapovalov V.V. Dinamika transportnykh tribosistem [Dynamics of transport tribosystems]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2005, no. 12, pp. 19–24.
6. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool wear in cutting edge treatment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 9785789016695.
7. Migranov M.Sh. Issledovaniya iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Research of wear of tool materials and coatings from the positions of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
8. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: /10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.
9. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 5, pp. 423–430. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.
10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Vliyanie dinamiki rezaniya na vybor tekhnologicheskikh rezhimov, obespechivayushchikh minimal'noe iznashivanie rezhushchikh instrumentov [Influence of cutting dynamic on the selection of the technological regimes to ensure minimal wear of cutting tools]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 54–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.
11. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibrations in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
12. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, Springer, 2013, pp. 3622–3636. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
13. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 30 (8), pp. 958–963. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
14. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 1–2, pp. 15–34. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
15. Karimov I.G. Vliyanie temperatury rezaniya na energeticheskie parametry kontakta instrumenta s detal'yu [Influence of the cutting temperature on the energy parameters of the tool contact with the part]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 16, no. 44 (49), pp. 85–89.
16. Gomez-Solano J.R., July C., Mehl J., Bechinger C. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, p. 045026. DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
17. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
18. Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the process of metalworking]. Patent RF, no. 2538750, 2015.
19. Zariktuev V.Ts. Avtomatizatsiya protsessov na osnove polozheniya ob optimal'noi temperature rezaniya [Automatization of process based on concept of optimal cutting temperature]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19.
20. Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M. Experimental study on the high speed machining of hardened steel. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 291–295. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.234.



21. Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 26, pp. 361–366. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.
22. Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y. The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining. *Strojniski Vestnik = Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 52 (2), pp. 124–134. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.
23. Kant G., Sangwan K.S. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 83, pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.
24. Ryzhkin A.A. [Synergetic aspects of managing the wear resistance of tool cutting materials]. *Dinamika tekhnicheskikh sistem: XII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Dynamics of technical systems. Proceedings of the XII scientific and technical international conference]. Rostov-on-Don, 2016, pp. 9–10. (In Russian).
25. Solomentsev Yu.M., Mitrofanov V.G., Timiryazev V.A. *Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na metallovezhushchikh stankakh* [Adaptive control of technological processes on machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 536 p.
26. Bazrov B.M. *Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoi obrabotki detalei s pomoshch'yu sistem adaptivnogo upravleniya* [Improving the efficiency of machining parts by means of systems of adaptive control]. Moscow, TsNIITEIllegpishchemash Publ., 1976. 67 p.
27. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Noveishie tendentsii v oblasti arkhitekturnykh reshenii sistem ChPU [Latest trends in the architecture of CNC systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2005, no. 4, pp. 3–9.
28. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 241–246. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.755.
29. Mikołajczyk T., Nowicki K., Kłodowski A., Pimenov D.Y. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 88, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.11.026.
30. Martinov G.M., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Collecting diagnostic operational data from CNC machines during operation process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 3, p. 033051. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033051.
31. Martinov G., Martinova L., Ljubimov A. From classic CNC systems to cloud-based technology and back. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 63. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.
32. Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R. Approach in implementing of logical task for numerical control on basis of concept “Industry 4.0”. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, Russia, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728584.
33. Kozlov A.M., Malyutin G.E., Handozhko A.V. Performance increase of precision volumetric milling on machines based on frame-accurate control. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1111–1119. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.10.603.
34. Arslan H., Er A.O., Orhan S., Aslan E. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 371–378. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.
35. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 384 p.
36. Boltyanskii V.G. Modelirovanie lineynykh optimal'nykh bystrodeystviy pri pomoshchi relejnykh skhem [The simulation of linear, optimal high-speed operations by relay circuits]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1961, vol. 139, no. 2, pp. 275–278.
37. Zakovorotny V.L., Bordatchev E.V., Sankar T.S. Variational formulation for optimal multi-cycle deep drilling of small holes. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 1997, vol. 119, no. 3, pp. 553–560. DOI: 10.1115/1.2801293.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.