

УДК 621.91.02

DOI: 10.30987/article\_5bd17b459c1d00.72079190

А.В. Анцев, Н.И. Пасько

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРА СЛУЧАЙНОСТИ

Предложена методика оптимизации режимов резания и периода профилактики режущих инструментов с учетом фактора случайности. В качестве критерия оптимальности предлагается применять отношение затрат времени или средств за достаточно большой период рабочего времени к наработке (числу обработанных деталей) за это время, то есть удельные затраты. Для учета разброса периода стойкости стойкостная зависимость понима-

ется как закон распределения наработки инструмента на отказ и зависимость параметров этого закона от параметров режима резания. Приведен пример применения методики для токарной обработки.

**Ключевые слова:** оптимизация, режимы резания, фактор случайности, удельные затраты, скорость резания, период стойкости, профилактическая замена, стойкостная зависимость.

A.V. Antsev, N.I. Pasko

## PECULIARITIES OF CUTTING MODE OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT RANDOM FACTOR

In modern mechanical engineering one usually uses durability dependences describing only the dependence of a mean durability period of a cutter upon cutting modes which do not take into account stochastic nature of cutter wear at the solution of the problem of cutting mode optimization.

But cutter durability (time to failure) is a random value depending upon many factors to which may belong a spread of a cutter durability period, equipment failures, an auxiliary time spread for machined parts and cutters replacement and so on. Therefore at the destination and optimization of cutting modes it is necessary to take into account a contingency of a cutting process. As a criterion for an optimum cutting mode it is offered to use a ratio of time costs or means for a working time long enough to a non-failure operating time (number of machined parts) in the course of this period of time, that is, specific costs.

The consideration of costs mentioned and operating time as accumulation processes with stationary

increments has shown that the ratio with the working time increase has a limit which should be considered a criterion of optimum. For the account of the durability period spread the durability dependence is comprehended in the interconnection of the law of the distribution of tool operating time for failure and the dependence of this law parameters upon cutting mode parameters.

By the example of cylindrical part turning there is considered an optimization of a cutting speed at a preventive replacement of a tool and tool replacement caused by a failure and also a joint optimization of a cutting speed and a preventive period of a tool. As a result it is defined that a preventive replacement is not always more advantageous than a replacement because of failure.

**Key words:** optimization, cutting modes, random factor, specific cost, cutting speed, durability time, preventive replacement, durability dependence.

Одной из важных задач современного машиностроения является повышение эффективности процесса резания на металлообрабатывающих станках, включая рациональное использование стойкостных ресурсов режущих инструментов путем оптимизации режимов резания.

В современном машиностроении традиционно при решении задачи оптимизации режимов резания используют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов реза-

ния и не учитывающие стохастическую природу износа режущего инструмента. Однако стойкость режущих инструментов (наработка на отказ, согласно терминологии теории надежности) является случайной величиной, зависящей от множества факторов: режимов резания, режущих свойств инструментов, вида обработки, твердости обрабатываемых деталей, величины припусков на обработку, предварительного напряженно-деформированного состояния, вибраций, геометрических погрешностей станка и др. [1–7]. При этом

разброс периода стойкости режущего инструмента существенен – от 15 до 35 % [8], что оказывает негативное влияние на эффективность процесса резания и усложняет задачу оптимизации режимов резания.

Таким образом, при назначении и оптимизации режимов резания необходимо учитывать случайность процесса резания.

Рассмотрим такие факторы, обеспечивающие случайность процесса резания, как разброс стойкости режущего инструмента, отказы оборудования, разброс вспомогательного времени на замену обработанных деталей и режущих инструментов. Главная особенность состоит в формулировке критерия оптимальности. В качестве такого критерия примем отношение затрат времени или средств  $Z(t)$  за достаточно большой период рабочего времени  $t$  к наработке (числу обработанных деталей)  $G(t)$  за это время, то есть

$$\Theta = \frac{Z(t)}{G(t)}. \quad (1)$$

Этот критерий будем называть удельными затратами [9]. Если  $Z(t)$  и  $G(t)$  рассматривать как случайные процессы накопления [10] со стационарными приращениями, то отношение (1) с ростом  $t$  стремится к пределу. Затраты  $Z(t)$  и наработка  $G(t)$  при сделанных предположениях имеют асимптотически нормальное распределение [10; 11] со средними значениями

$$\bar{Z}(t) = a_z t + b_z, \quad \bar{G}(t) = a_g t + b_g$$

и дисперсиями

$$D_Z(t) = d_z t + c_z, \quad D_G(t) = d_g t + c_g.$$

Среднее значение здесь и в дальнейшем – это математическое ожидание или среднее арифметическое как оценка математического ожидания случайной величины из опыта.

Если в  $Z(t)$  и  $G(t)$  выделить детерминированную и случайную компоненты, то

$$\Theta = \frac{\bar{Z}(t) + \sqrt{D_Z(t)}\zeta}{\bar{G}(t) + \sqrt{D_G(t)}\xi},$$

где  $\zeta$  и  $\xi$  – нормально распределенные случайные величины с нулевым математи-

ческим ожиданием и единичной дисперсией. В пределе при  $t \rightarrow \infty$  получаем, что

$$\Theta = \frac{a_z}{a_g} \quad (2)$$

и

$$a_z = \lim \frac{Z(t)}{t}, \quad a_g = \lim \frac{G(t)}{t},$$

где  $a_z$  – средняя интенсивность затрат средств или времени;  $a_g$  – средняя производительность.

В общем случае для определения критерия (2) необходимо знать обобщенную стойкостную зависимость, то есть закон распределения периода стойкости и зависимость параметров этого закона от параметров режима резания, а также законы распределения других случайных величин, от которых зависят  $Z(t)$  и  $G(t)$ . В ряде практически важных случаев задача облегчается в связи с тем, что  $a_z$  и  $a_g$  зависят только от математических ожиданий соответствующих случайных величин. Рассмотрим это на примерах.

Определим критерий оптимальности на примере токарной обработки цилиндрической поверхности детали длиной  $l$  и диаметром  $d$ . Удельные затраты (2), если резец заменяется по мере отказа (предельного износа или поломки), получаются как отношение средних затрат за период стойкости резца к среднему значению периода стойкости в штуках обработанных деталей:

$$\Theta = \frac{\bar{G}\bar{t}_{\text{ц}} + \bar{t}_{\text{зам}}}{\bar{G}} = \bar{t}_{\text{ц}} + \frac{\bar{t}_{\text{зам}}}{\bar{G}}. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{G} = \bar{T}/t_{\text{рез}}$  – среднее значение (математическое ожидание) периода стойкости в штуках обработанных деталей,  $\bar{T}$  – математическое ожидание периода стойкости в минутах времени резания,  $t_{\text{рез}} = l/(nS)$  – время резания детали,  $S$  – подача в мм на оборот шпинделя,  $n = 1000V/(\pi d)$  – частота вращения шпинделя,  $V$  – скорость резания в м/мин;  $\bar{t}_{\text{зам}}$  – средние затраты времени, связанные с заменой резца;  $\bar{t}_{\text{ц}} = \bar{t}_{\text{рх}} + \bar{t}_{\text{хх}} + \bar{t}_{\text{зд}}$  – длительность цикла обработки детали в минутах

рабочего времени,  $t_{xx}$  – время холостых ходов, не зависящее от скорости резания и подачи,  $\bar{t}_{зд}$  – среднее время, связанное с заменой обработанной детали,  $t_{px} = t_{pez} \Lambda$  – время хода на рабочей подаче (оно включает время резания и время холостого хода на рабочей подаче при врезании и выходе),  $\Lambda$  – коэффициент времени резания [12].

Важно отметить, что в качестве средней стойкости здесь используется *математическое ожидание периода стойкости*, которое оценивается из опыта как среднее арифметическое периода стойкости. Предложение некоторых авторов [12; 13] использовать в качестве такой стойкости моду (наиболее вероятное значение периода стойкости) приводит к парадоксам. Например, при показательном распределении периода стойкости, которое встречается на практике, мода равна нулю, а значит, и стойкость равна нулю. Использование медианы в качестве средней стойкости приводит к систематической погрешности, если математическое ожидание и медиана не совпадают.

Таким образом, если при расчете затрат все случайные величины заменить их математическими ожиданиями, включая и периоды стойкости, то при оптимизации одноинструментной или многоинструментной обработки, когда каждый переход операции выполняется своим инструментом со своими режимами резания и с заменой инструмента по отказу, остается в силе методика Г.И. Темчина [12].

При профилактической (планово-предупредительной) замене инструмента, параллельной замене [14], при периоде стойкости, близком к длительности цикла обработки детали, и в некоторых других

случаях для оптимизации знания стойкостной зависимости как зависимости средней стойкости от параметров режима резания уже недостаточно. Следует учитывать и разброс стойкости, то есть следует знать функцию надежности инструмента и зависимость параметров этой функции от параметров режима резания. Таким образом, в общем случае для оптимизации режимов резания надо знать обобщенную стойкостную зависимость, включающую закон распределения периода стойкости и зависимость параметров этого закона от параметров режима резания.

Рассмотрим случай оптимизации при профилактической замене инструмента при тех же прочих исходных данных. Рассмотрим вариант профилактической замены, когда резец заменяется после обработки  $g_{\Pi}$  деталей или по отказу, если отказ произошел раньше. В этом случае удельные затраты времени

$$\Theta = \bar{t}_{\Pi} + \frac{\bar{t}_{\text{зот}}(1 - P(g_{\Pi})) + \bar{t}_{\text{зп}}P(g_{\Pi})}{\bar{G}_{\Pi}}. \quad (4)$$

Здесь  $\bar{t}_{\text{зот}}$  – средние затраты времени, связанные с заменой отказавшего резца;  $\bar{t}_{\text{зп}}$  – аналогичные затраты, но связанные с профилактической заменой резца;  $P(g_{\Pi})$  – вероятность безотказной работы резца при обработке  $g_{\Pi}$  деталей с момента смены резца;  $1 - P(g_{\Pi})$  – вероятность, что отказ резца произойдет раньше;  $\bar{G}_{\Pi}$  – среднее число обработанных деталей на резец до его замены. Если  $P(t)$  – вероятность безотказной работы резца в течение времени резания  $t$  (функция надежности резца), то

$$P(g) = P(t/t_{\text{pez}}), \quad t_{\Pi} = g_{\Pi} t_{\text{pez}}, \quad \bar{G}_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} P(t) dt = \int_0^{g_{\Pi}} P(g) dg.$$

Рассмотрим подробнее случай оптимизации, когда наработка на отказ  $T$  под-

чиняется логнормальному распределению [9], то есть плотность распределения

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_T t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \ln \hat{T})^2}{2\delta_T^2}\right],$$

а функция надежности  $P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$ .

Здесь  $\hat{T}$  – среднегеометрический период стойкости;  $\delta_T$  – квадратичное отклонение логарифма стойкости. Математическое ожидание периода стойкости (средняя

стойкость)  $\bar{T} = \hat{T} \exp(\delta_T^2 / 2)$ . Коэффициент вариации периода стойкости  $K_T = \sqrt{\exp(\delta_T^2) - 1}$ .

Проведем расчет при стойкостной зависимости с математическим ожиданием

$$\bar{T} = \exp(106,59 - 77,56 \ln V + 19,55 \ln^2 V - 1,65 \ln^3 V + 1,73 \ln S - 0,46 \ln V \ln S) \exp(\delta_T^2 / 2)$$

и  $\delta_T = 0,315$ . При этом коэффициент вариации  $K_T = 0,323$ . Такая зависимость получена с использованием метода наименьших квадратов в логарифмической системе координат  $(\ln V, \ln S, \ln T)$  по данным работы [15], что позволило учесть горбообразный характер зависимости  $\bar{T}$  от  $V$  и корреляцию между  $\ln V$  и  $\ln S$ .

Другие исходные данные: длина обработки  $l = 200$  мм; диаметр обработки  $d = 60$  мм; коэффициент времени резания  $\Lambda = 0,95$ ; время замены резца в связи с отказом  $\bar{t}_{30T} = 10$  мин; время в связи с профилактической заменой резца  $\bar{t}_{3П} = 2$  мин; время, связанное с заменой обработанной

детали,  $\bar{t}_{зд} = 1$  мин; время холостых ходов  $t_{xx} = 0,1$  мин.

Результаты оптимизации при отмеченных исходных данных сведены в табл. 1. Оптимизация проводилась простым перебором вариантов по скорости резания  $V$  от 10 до 200 м/с с шагом 1 м/с и по периоду профилактической замены в штуках обработанных деталей  $g_{П}$  от 1 до 200 шт. Разработанная программа позволяет оптимизировать либо только скорость резания при фиксированном периоде профилактики, либо только период профилактики при фиксированной скорости резания, либо проводить совместную оптимизацию по критериям (3) и (4). Подача задается явно.

Таблица 1

Результаты оптимизации скорости резания и периода профилактической замены резца при различных значениях подачи

Подача, мм/об	0,1	0,2	0,3	0,4
Скорость резания, м/мин	153	146	125	94
Период проф.замены резца, шт.	5	7	14	24
Удельные затраты, мин/шт.	3,98	2,65	2,22	2,15
Вероятность проф. замены резца	0,93	0,97	0,96	0,96
Средняя производительность, шт./ч	15,1	22,6	27,0	27,9

Средняя производительность определяется через удельные затраты времени как  $60/\Theta$ .

В табл. 2 приведены результаты оптимизации скорости резания по критерию

(3), когда замена резца проводится только после его отказа.

Таблица 2

Результаты оптимизации скорости резания при замене резца по отказу

Подача, мм/об	0,1	0,2	0,3	0,4
Скорость резания, м/мин	152	130	118	110
Удельные затраты, мин/шт.	3,95	2,86	2,46	2,24
Средняя производительность, шт./ч	15,2	21,0	24,4	26,8

Сравнение таблиц показывает, что профилактическая замена инструмента не всегда выгоднее замены по отказу. При подаче 0,1 мм/об она по удельным затратам менее эффективна. Это связано с разбросом периода стойкости. Если коэффициент вариации стойкости  $K_T$  снизить до

0,2, то профилактическая замена окажется эффективной и при  $S = 0,1$  мм/об. Удельные затраты в этом случае снизятся до 3,84 мин/шт. Но если мы ошибочно назначим период профилактики не 5, а 10, то удельные затраты вырастут до 4,13 мин/шт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивахненко, А.Г. Конструкторское и технологическое обеспечение точности обработки на станках с гибридной компоновкой / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, А.В. Олейник, А.Ю. Алтухов, П.В. Чаплыгин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». – 2014. – № 4. – С. 15-22.
- Аникеева, О.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2 (298). – С. 159-164.
- Аникеева, О.В. Построение моделей схемно-параметрической надежности металлорежущих станков / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, В.Е. Пузанов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 5 (50). – С. 148-155.
- Муратов, К.Р. Влияние жесткой и фрикционной кинематической связи в контакте инструмент-деталь на равномерность износа инструмента / К.Р. Муратов // СТИН. – 2015. – № 9. – С. 23-26.
- Уткин, Е.Ф. Оценка влияния деформационных процессов в контактируемых зонах обрабатываемого и инструментального материалов на износ режущего инструмента / Е.Ф. Уткин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (29). – Т. 1. – С. 132-134.
- Козлов, В.И. Анализ влияния относительных колебаний на износ лезвийного инструмента / В.И. Козлов // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 9-14.
- Ivakhnenko, A.G. Design and technological support of machining accuracy on machines with hybrid assembly / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, A.V. Oleynik, A.Yu. Altukhov, P.V. Chaplygin // *Transactions of South-Western State University. Series "Engineering and Technologies"*. – 2014. – No.4. – pp. 15-22.
- Anikeeva, O.V. Parameter reliability prediction of precision manufacturing equipment / O.V. Anikeeva, A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2013. – No.2 (298). – pp. 159-164.
- Anikeeva, O.V. Formation of circuit-parameter reliability of machine-tools / O.V. Anikeeva, A.G. Ivakhnenko, V.E. Puzanov // *Proceedings of South-Western State University*. – 2013. – No.5 (50). – pp. 148-155.
- Muratov, K.R. *Impact of Rigid and Friction Kinematical Connection in Tool-Part Contact upon Tool Wear Smoothness* / K.R. Muratov // *STIN*. – 2015. – No.9. – pp. 23-26.
- Utkin, E.F. Assessment of deformation process impact in contact areas of worked and tool material upon cutter wear / E.F. Utkin // *Transactions of Volgograd State Technical University*. – 2007. – No.3 (29). – Vol.1. – pp. 132-134.
- Kozlov, V.I. *Analysis of Relative Oscillation Impact upon Edge Tool Wear* / V.I. Kozlov // *STIN*. – 2008. – No.1. – pp. 9-14.
- Полянчиков, Ю.Н. Влияние механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности инструмента / Ю.Н. Полянчиков, С.М. Пахтусов, В.А. Солодков, Н.П. Черемушников, А.В. Кумаков, Д.В. Крайнев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2004. – № 9. – С. 42-44.
- Мартинов, Г.М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г.М. Мартинов, А.С. Григорьев // СТИН. – 2012. – № 12. – С. 23-27.
- Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 174 с.
- Кокс, Д. Теория восстановления / Д. Кокс, В. Смит. – М.: Сов. радио, 1967. – 300 с.
- Ибрагимов, И.А. Независимые и стационарно связанные случайные величины / И.А. Ибрагимов, Ю.В. Линник. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
- Темчин, Г.И. Многоинструментные наладки. Теория и расчет / Г.И. Темчин. – М.: Машгиз, 1963. – 544 с.
- Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / А.М. Гильман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.
- Иноземцев, А.Н. Надежность станков и станочных систем: учеб. пособие / А.Н. Иноземцев, Н.И. Пасько. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2002. – 182 с.
- Макаров, А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

7. Polyanchikov, Yu.N. Impact of contact interaction mechanism upon tool cutting face wear / Yu.N. Polyanchikov, S.M. Pakhtusov, V.A. Solodkov, N.P. Cheryomushnikov, A.V. Kumakov, D.V. Kraynev // *Proceedings of Volgograd State Technical University*. – 2004. – No.9. – pp. 42-44.
8. Martinov, G.M. Diagnostics of Cutters and Prediction of Their Residual Durability on NC Machines During Machining / G.M. Martinov, A.S. Grigoriev // *STIN*. – 2012. – No.12. – pp. 23-27.
9. *Generalized Stochastic Model of Cutter Failures and Its Application* / N.I. Pasko [et al.]. – Tula: Publishing House of Tula SU, 2016. – pp. 174.
10. Coks, D. *Theory of Restoration* / D. Koks, V. Smith. – M.: Sov. Radio, 1967. – pp. 300.
11. Ibragimov, I.A. *Independent and Stationary-connected Random Values* / I.A. Ibragimov, Yu.V. Linnik. – M.: Science, 1965. – pp. 524.
12. Temchin, G.I. *Multi-tool Setups. Theory and Computation* / G.I. Temchin. – M.: Machgiz, 1963. – pp. 544.
13. *Optimization of Cutting Modes on Machine Tools* / A.M. Gilman [et al.]. – M.: Mechanical Engineering, 1972. – pp. 188.
14. Inozemtsev, A.N. *Reliability of Machines and Machine Systems: manual* / A.N. Inozemtsev, N.I. Pasko. – Tula: Publishing House of Tula SU, 2002. – pp. 182.
15. Makarov, A.D. *Wear and Durability of Cutters* / A.D. Makarov. – M.: Mechanical Engineering, 1966. – pp. 264.

*Статья поступила в редакцию 27.07.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета*

*Ивахненко А.Г.*

*Статья принята к публикации 14.08.18.*

#### Сведения об авторах:

**Анцев Александр Витальевич**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета, тел.: (4872) 25-46-48, e-mail: [a.antsev@yandex.ru](mailto:a.antsev@yandex.ru).

**Пасько Николай Иванович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета, тел.: (4872) 25-46-48.

**Antsev Alexander Vitalievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Tula State University, e-mail: [a.antsev@yandex.ru](mailto:a.antsev@yandex.ru).

**Pasko Nikolay Ivanovich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Tula State University, Phone: (4872) 25-46-48.