

УДК 621.924

Залогов В. А., Дядюра К. А., Нагорный В. В.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ МЕТАЛЛОВ

За прошедшее десятилетие в современном машиностроении произошли значительные изменения, которые связаны в первую очередь с компьютеризацией производственных процессов и использованием микропроцессорных систем для управления процессами резания. В настоящее время при резке сокращении количества высококвалифицированных рабочих-станочников это становится весьма актуальным.

Введение в станок дополнительных управляющих функций позволяет с помощью специальных датчиков получать информацию о состоянии заготовки (обрабатываемой детали), инструмента, станка и непрерывно использовать ее для адаптивного управления процессом резания. Этим сразу разрешается несколько проблем, в частности, повышается производительность процесса обработки, точность и качество поверхностей изготавливаемых деталей. Все это приводит к снижению издержек машиностроительного производства и позволяет, в конечном итоге, решать одну из важнейших задач управления жизненным циклом изделия (ЖЦИ) на этапе его изготовления: выпуск конкурентоспособной продукции.

Оптимальное управление производством начинается на «атомарном уровне» с комплекса «процесс-оборудование-инструмент», где ключевой проблемой является надежность инструмента, как наиболее слабого элемента этой системы и вероятностный характер механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов [1, 2].

Последнее обусловлено неминуемым разбросом свойств материалов на их молекулярном уровне. Именно это обстоятельство в определяющей мере обуславливает относительно большой разброс эксплуатационных свойств практически любого изделия. На практике это приводит либо к неожиданному выходу его из строя, либо к преждевременному прерыванию процесса его эксплуатации.

Выходом из данной ситуации является эксплуатация инструмента на основе адекватного прогнозирования его фактического ресурса [3]. В противном случае компьютеризация производственных процессов, в том числе и станочного оборудования, не приведет к желаемому результату. Для определения фактического ресурса инструмента можно воспользоваться методами, применяемыми с этой же целью в технической диагностике.

Техническая диагностика определяет состояние объекта диагностирования по косвенным признакам, в частности, вибродиагностика оценивает состояние объекта по характеру акустического сигнала (звука, шума, вибраций) [4], сопровождающих его работу [5, 6]. Это основывается на корреляции (1) между структурными параметрами r_i , характеризующими сборочное и прочностное состояние объекта диагностирования, и их диагностическими признаками u_j , которые регистрируются в процессе диагностирования технического состояния объекта.

$$r_i = F_i(u_j). \quad (1)$$

Целью работы является управление режимом резания (скорость резания v , подача S , глубина резания t) на основе прогнозирования фактического ресурса режущего инструмента по достижению диагностическим признаком своего предельного значения для конкретной комбинации инструментального и обрабатываемого материалов.

Для инструмента структурным параметром является величина износа его режущих кромок, которая измеряется в характерных зонах передней и задней поверхности лезвия. При этом более предпочтительным является использование удельной количественной характеристики

износостойкости инструмента – интенсивности изнашивания J [3]. Интенсивность изнашивания может определяться как отношение величины износа ко времени резания, пути резания (или объему снятого материала) [3]:

$$J_T = \Delta h_3 / \Delta T; \quad J_l = \Delta h_3 / \Delta l; \quad (J_Q = \Delta h_3 / \Delta Q), \quad (2)$$

где Δh_3 – приращение величины площадки износа по задней поверхности за время ΔT , длину пути резания Δl , объема снятого материала ΔQ .

В период установившегося резания (без учета времени приработки и времени катастрофического изнашивания) выражение (2) относительно Δl можно записать в следующем виде:

$$J = \frac{h - h_1}{(t - t_1) \cdot n} = \frac{h_{\max} - h}{(T - t) \cdot n}, \quad (3)$$

где h , h_1 , h_{\max} – величина износа лезвия инструмента, соответственно: первоначальная, зафиксированная на момент времени t ; текущая – после работы в течение времени t_1 ; максимальная после резания в течение времени T , при которой процесс резания прекращается; n – скорость резания.

В данном случае параметр T характеризует ресурс лезвия инструмента, т. е. время работы его до отказа. Под отказом, как правило, понимают [8] нарушение работоспособного состояния режущего инструмента – отклонение от установленных значений, хотя бы одного из его параметров, требований или характеристик обработки, выполняемой этим инструментом. К характеристикам обработки относят: силу резания, температуру резания, уровень вибраций и др.

Выражение (3) можно переписать следующим образом:

$$\frac{h - h_1}{h_{\max} - h} = \frac{t - t_1}{T - t}. \quad (4)$$

Изменение с течением времени диагностического параметра (уровня акустического сигнала), генерируемого процессом резания, описывается следующим выражением, отражающим механику разрушения инструмента:

$$A = A_1 + \Delta A \cdot \left(\frac{t - t_1}{T - t} \right)^n, \quad (5)$$

где $\Delta A = A_{\max} - A$ – разница между максимальным и уровнем акустического сигнала на момент времени t , A_1 – уровень акустического сигнала после работы лезвия инструмента в течение времени t_1 .

Под максимальным уровнем акустического сигнала A_{\max} понимается уровень звука, при возникновении которого процесс резания прекращается, из-за недопустимой степени износа лезвия инструмента.

Параметры: ΔA , T , n определяются в процессе аппроксимации изменения во времени диагностического параметра A графиком аналитической зависимости (5).

Выражение (5) можно преобразовать следующим образом:

$$\left(\frac{A - A_1}{A_{\max} - A} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{t - t_1}{T - t}. \quad (6)$$

Видно, что правые части выражений (4) и (6) совпадают, следовательно, можно допустить, что их левые части так же равны между собой, т. е.:

$$\frac{h - h_1}{h_{\max} - h_1} = \left(\frac{A - A_1}{A_{\max} - A_1} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (7)$$

При этом в знаменателе значения износа h и уровня акустического сигнала A заменяем величинами, соответственно h_1 и A_1 . Это позволяет на основании анализа характера изменения уровня акустического сигнала оценить за время резания t_1 величину относительного износа инструмента. Относительный износ количественно характеризует степень износа инструмента и изменяется от нуля до единицы или в процентах от 0 до 100%. Между износом, возникающим в процессе резания и уровнем акустического сигнала, сопровождающим этот процесс, существует тесная корреляция [9], что позволяет использовать данный диагностический параметр для оценки работоспособного состояния инструмента.

Рассмотрим модель управления техническим состоянием процесса механической обработки металлов резанием.

Скорость износа γ пропорциональна произведению усилия прижатия P_{np} , действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения $V_{ск}$ [10].

$$g \approx P_{np} \cdot V_{ск}. \quad (8)$$

В данном случае трущейся парой является «резец – обрабатываемая заготовка». Действующее в ней усилие определяется по следующей формуле [11]:

$$P_{рез} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (9)$$

где $P_{x,y,z}$ – составляющие силы резания в H , определяемые в свою очередь по следующей эмпирической формуле [11]:

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p t^x S^y v^n K_p, \quad (10)$$

где t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; v – скорость резания, м/мин; C_p – постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов; K_p – поправочный коэффициент.

Скорость резания (относительная скорость скольжения $V_{ск}$) определяется по эмпирической формуле [11]:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot b \cdot S^a}, \quad (11)$$

где C_v – поправочный коэффициент.

Значения поправочных коэффициентов и показателей степени, содержащихся в этих формулах, так же как и периода стойкости T инструмента, применяемого для данного вида обработки, приводятся в соответствующих справочниках, например, в [11].

Для изменения степени износа инструмента необходимо изменять скорость износа γ , следовательно, необходимо изменять величину множителей P_{np} и $V_{ск}$. Это в свою очередь требует изменения параметров резания: S , v и t . Скорость резания, связанная с частотой вращения, и подача зависят от кинематики станка и изменяются в геометрической прогрессии. Глубина резания t является свободно варьируемой величиной, поэтому для удобства дальнейшего рассмотрения необходимо выразить её через задаваемые величины S и v .

$$t = b \sqrt{\frac{C_v}{T^m \cdot v \cdot S^a}}. \quad (12)$$

Далее, для того, чтобы избавиться от поправочных коэффициентов, являющихся «коэффициентами неопределенности» в формулах (10) и (11) следует перейти к безразмерным величинам:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\frac{t}{t_0} \right)^x \left(\frac{S}{S_0} \right)^y \left(\frac{v}{v_0} \right)^n, \quad (13)$$

где t_0, S_0, v_0 – расчетные (исходные) значения параметров режима резания, задаваемые традиционным способом в начале обработки детали.

С учетом (12) выражение (13) представим в следующем виде:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\left(\frac{T_{TP}}{T_\Phi} \right)^m \left(\frac{V_0}{V} \right) \left(\frac{S_0}{S} \right)^a \right)^{\frac{x}{b}} \left(\frac{S}{S_0} \right)^y \left(\frac{V}{V_0} \right)^n. \quad (14)$$

Или в более компактной форме:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\frac{T_{TP}}{T_\Phi} \right)^{\frac{m \cdot x}{b}} \left(\frac{S}{S_0} \right)^{y - \frac{a \cdot x}{b}} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n - \frac{x}{b}}, \quad (15)$$

где T_{TP} – необходимый (требуемый) для выполнения данного технологического процесса резания ресурс лезвия инструмента; T_Φ – фактический (прогнозируемый) ресурс лезвия инструмента.

Под фактическим ресурсом T_Φ понимается параметр T функции (5), определяемый при аппроксимации результатов диагностического контроля состояния трущейся пары «резец – обрабатываемая заготовка» графиком этой функции.

Алгоритм управления процессом резания основывается на уменьшении скорости износа резца до величины, обеспечивающей реализацию на практике требуемого ресурса, и состоит из следующей последовательности:

- по принятой методике [11] рассчитывается режим резания (параметры t_0, S_0, v_0);
- контролируется фактический уровень акустического сигнала (A_Φ), генерируемый процессом резания;
- результаты контроля (зависимость уровня акустического сигнала от времени резания $A_\Phi(t)$) аппроксимируются графиком функции (4), при этом определяются параметры: $\Delta A, n$ и T ;
- если параметр T превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т. е. выполняется условие $T_\Phi > T_{TP}$, то резание продолжается на том же режиме; если нет, то проводится изменение режима резания таким образом, чтобы условие $T_\Phi > T_{TP}$ выполнялось;
- требуемые параметры резания определяются путем минимизации следующего функционала:

$$U = \left(\bar{P}_{рез} \cdot \bar{n} - \frac{A_{mp}(t)}{A_\Phi(t)} \right)^2, \quad (16)$$

где $\bar{P}_{рез} = \sqrt{\bar{P}_x^2 + \bar{P}_y^2 + \bar{P}_z^2}$ – относительная величина силы резания;

$\bar{n} = \frac{n(t)}{n_0}$, $v(t)$ – регулируемая скорость резания, которая выбирается в соответствии

с кинематикой станка.

Рассмотрим управление процессом резания на станке 16К20Т1, обороты которого n можно изменять на III режиме при знаменателе геометрической прогрессии $q = 1,44$ от 125 об/мин до 2000 об/мин, подачу S можно изменять с шагом 0,01 мм/об от 0,01 мм/об до 2,8 мм/об. Обрабатываемый материал – Сталь 40Х, инструментальный материал – твердый сплав Т15К6. Исходный режим резания: $v = 94$ м/мин, ($n = 500$ об/мин), $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,5$ м. Показатели степени в формуле (15) имеют следующие значения: $\beta = 0,2$; $m = 0,2$; $\alpha = 0,35$; $n = -0,4$ (для P_x), $-0,3$ (для P_y), $-0,15$ (для P_z); $x = 1,05$ (для P_x), $0,6$ (для P_y), $0,9$ (для P_z); $y = 0,2$ (для P_x), $0,8$ (для P_y), $0,9$ (для P_z).

Контроль за уровнем акустического сигнала осуществлялся в течение всего процесса обработки детали с помощью микрофона, установленного вблизи зоны резания; сигнал с микрофона подавался на «звуковую карту» компьютера, где подвергался оцифровке с помощью программы «WAVE» [12], создающей файл с расширением *.wave. Этот файл подвергался дальнейшему анализу с помощью специально разработанной для этого компьютерной программы «REZEC», написанной на языке «Турбо Паскаль» и реализующей изложенный выше алгоритм управления процессом резания.

Результат работы программы приведен ниже на рис. 1, 2 и в табл. 1. В примере в качестве требуемого ресурса T_{TP} рассматривается 60 мин.

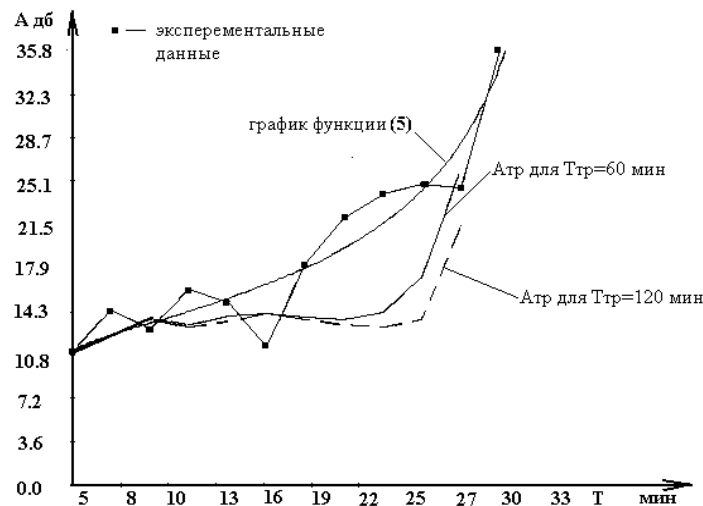


Рис. 1. Изменение с течением времени фактического и требуемых уровней акустического сигнала

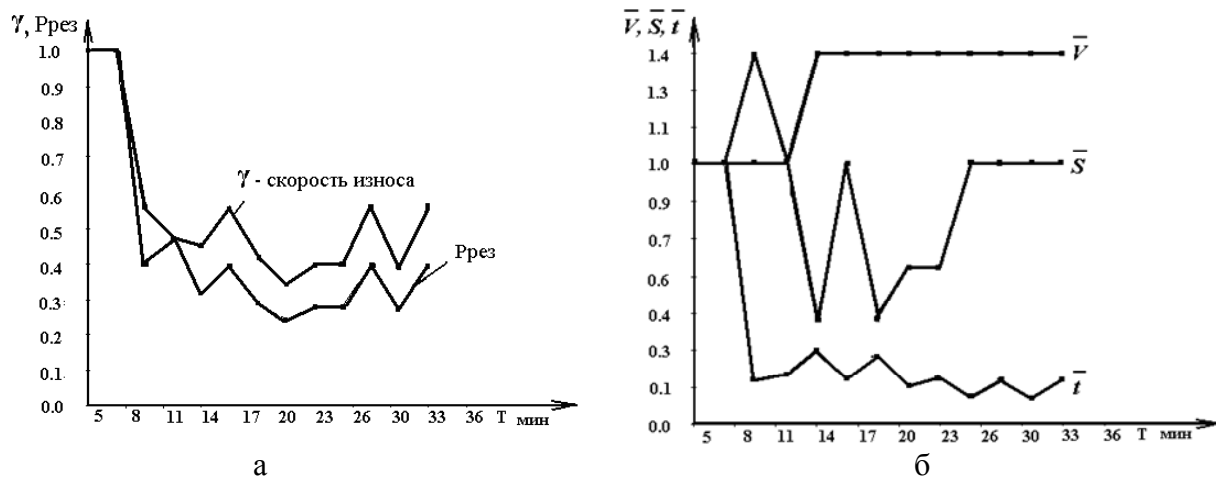


Рис. 2. Характер изменения с течением времени:

а – требуемой скорости износа γ и силы резания $P_{рез}$ по отношению к исходным их значениям при $T_{TP} = 60$ мин; б – требуемых параметров режима резания по отношению к исходным их значениям при $T_{TP} = 60$ мин

Из анализа результатов работы программы следует, что для обеспечения требуемого ресурса режущего лезвия необходимо уменьшить скорость износа и усилие резания в два и более раз, при этом следует увеличивать скорость резания n (от 94 м/мин до 133 м/мин), а подачу S уменьшать, соответственно от 0,05 мм/об до 0,02 мм/об. Глубина резания t также будет уменьшаться от 0,1 мм до 0,6 мм поскольку связана с параметрами n и S зависимостью (12). При этом шероховатость поверхности детали и температура в зоне резания не возрастут, т. к. параметры, от которых они зависят (подача и глубина резания) не превышают их исходные значения.

Таблиця 1

Сводные данные по режимам резания, обеспечивающие заданную стойкость инструмента

Шаг управления режимом резания	Т _{гр} = 60 мин									
	Относительные величины					Абсолютные величины				
	\bar{n}	\bar{S}	\bar{t}	\bar{P}_{PEZ}	\bar{g}	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	$P_{рез}$, Н	n , об/мин
1	1,42	1,00	0,17	0,39	0,56	133	0,05	0,08	8,03	710
2	1,00	1,00	0,19	0,47	0,47	94	0,05	0,09	9,60	500
3	1,42	0,4	0,29	0,31	0,44	133	0,02	0,02	6,42	710
4	1,42	1,00	0,17	0,39	0,56	133	0,05	0,08	8,03	710
5	1,42	0,4	0,26	0,29	0,41	133	0,02	0,13	5,99	710
6	1,42	0,60	0,14	0,24	0,34	133	0,03	0,07	4,92	710
7	1,42	0,60	0,17	0,27	0,39	133	0,03	0,03	5,68	710
8	1,42	1,00	0,10	0,28	0,39	133	0,05	0,05	5,69	710
9	1,42	1,00	0,17	0,39	0,56	133	0,05	0,08	8,03	710
10	1,42	1,00	0,10	0,27	0,38	133	0,05	0,05	5,54	710
11	1,42	1,00	0,17	0,39	0,56	133	0,05	0,08	8,03	710

ВЫВОДЫ

Оптимальное управление производством начинается с комплекса «процесс-оборудование-инструмент», где ключевой проблемой является непредсказуемая заранее фактическая стойкость инструмента. Как инструмент, так и заготовка – будущая деталь – обладают, в общем-то, непредсказуемыми прочностными свойствами. Последнее обусловлено неминуемым разбросом свойств материалов на их молекулярном уровне. Выходом из данной ситуации является эксплуатация инструмента на основе прогнозирования его фактического ресурса. В статье показано, что прогнозирование фактического ресурса и управление на основе этого режимом резания возможно на основе корреляционной зависимости между износом режущего лезвия и уровнем акустического сигнала, сопровождающего процесс резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старков В. К. *Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве* / Старков В. К. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
2. Юркевич В. В. *Прогнозирование точности изготовления деталей* / В. В. Юркевич // *Техника машиностроения*. – 2000. – № 4 (26). – С. 46–52.
3. Талантов Н. В. *Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента* / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 234 с.
4. Генкин М. Д. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов* / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. Подураев В. Н. *Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии* / В. Н. Подураев, А. А. Базров, В. А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
6. Аршанский М. М. *Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках* / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
7. Кушнер В. С. *Влияние температуры на основные физические характеристики процесса резания* / В. С. Кушнер // *Физика и химия обработки материалов*. – 1985. – № 4. – С. 45–60.
8. Хаев Г. Л. *Сборный твердосплавный инструмент* / Г. Л. Хаев, В. М. Гах, К. Г. Громаков. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
9. Дядюра К. А. *Оптимизация механической обработки адаптивным управлением на основе анализа шума резания* / К. А. Дядюра, Р. Н. Зинченко, В. В. Нагорный // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2008. – № 3 (13). – С. 63–69.
10. Проников А. С. *Параметрическая надежность машин* / А. С. Проников. – М.: МГТУ им. Баумана, 2002. – 560 с.
11. Косилова А. Г. *Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2* / А. Г. Косилова, Р. К. Мецераков. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
12. Зинченко Р. М. *Підвищення ефективності точіння за рахунок діагностики зношування інструменту по акустичному випромінюванню: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти»* / Р. М. Зинченко. – Харків, 2005. – 23 с.