

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

**Актуальность.** В статье изложены результаты исследований по разработке новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, послужившей основой автоматизированной системы управления работой металлообрабатывающего оборудования. Прогнозирование индивидуального ресурса режущего инструмента является злободневной, но так и не решенной до сих пор проблемой, что и определяет актуальность изложенного в статье материала.

**Цель работы** – разработка новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

**Метод.** Предложен метод управления работой металлообрабатывающего оборудования, сочетающий в рамках единого процесса решения задач идентификации и управления. Идентификации подвергается модель тренда информационного сигнала, генерируемого в процессе работы обрабатываемой системы, которая используется в качестве модели, описывающей динамику поднадзорного оборудования. По результатам прогнозирования индивидуального ресурса инструмента и сопоставления его с требуемой длительностью механической обработки, принимается решение о варьировании величин управляющих параметров (подачи и оборотов шпинделя), обеспечивающих реализацию на вновь назначенных режимах необходимого периода бездефектной эксплуатации инструмента.

**Результаты.** Разработан программный продукт, составивший основу автоматизированной системы адаптивного управления работой металлообрабатывающих технологических систем, алгоритм работы которых отражает предложенную методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенной методологии прогнозирования ресурса режущего инструмента и работоспособность аппаратно-программного комплекса, реализующего данную методологию в практике резания. Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике машиностроения удалось разработать совершенно новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса рабочего инструмента, что позволяет целенаправленно управлять длительностью протекания технологического процесса, ориентируясь на фактическое техническое состояние основного элемента технологической системы. Практическая значимость полученных результатов заключается в создании программно-аппаратного комплекса, автоматизирующего процесс адаптивного управления режимами резания и содержащего программное обеспечение, которое отражает алгоритм новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента. Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования.

Внедрение подобной методологии контроля не только в процесс изготовления, но и в условия эксплуатации разнообразных по конструкции и назначению машин и механизмов, решает давно стоящую на повестке дня проблему определения индивидуального ресурса технических систем, что и определяет ценность проведенных исследований и их заметный вклад в науку управления.

**Ключевые слова:** автоматизация, адаптивное управление, индивидуальный ресурс, программный продукт, обработка резанием, обрабатываемые системы, прогноз ресурса, идентификация, тренд информационного сигнала, математическая модель, период бездефектной обработки, состояние поднадзорного оборудования.

### НОМЕНКЛАТУРА

$V$  – скорость резания;

$S$  – подача;

$t$  – глубина резания;

$[h_3]$  – предельно допустимая величина износа по задней поверхности лезвия режущего инструмента;

$\gamma$  – интенсивность (скорость) изнашивания инструмента;

$T$  – ресурс инструмента;

$T_{\text{Инд}}$  – индивидуальный ресурс инструмента;

$T_{\text{Тр}}$  – требуемая по техпроцессу длительность обработки детали (длительность прохода);

$D$  – диаметр заготовки;

$L$  – протяженность (длина) обработанной поверхности;

$V_0$  – исходное (заданное по техпроцессу) значение скорости резания;

$S_0$  – исходное (заданное по техпроцессу) значение подачи;

$E_{\text{ЗВ}}^{\text{Р}}$  – расчетное значение тренда звука;

$E_{\text{ЗВ}0}^{\text{Р}}$  – исходное расчетное значение тренда звука;

$\tau$  – текущая наработка режущего инструмента;

$\alpha$  – показатель степени;

$E_{\text{ЗВ}}^{\text{Ф}}$  – фактическое значение тренда (временного ряда) звука, генерируемого процессом лезвийной обработки;  $k$  – количество измерений, проведенных за все время контроля состояния режущего инструмента;

$P_{\text{ПР}}$  – усилие прижатия, действующего в трущейся паре;

$V_{\text{СК}}$  – скорость относительного скольжения трущихся пар;

$\sigma$  – механические напряжения;

$\sigma_{-1}$  – предел усталости;

$N_0$  – базовое число циклов;

$N$  – наработка в циклах режущего инструмента до разрушения;

$m$  – показатель степени кривой усталости;  
 $P_{x,y,z}$  – составляющие силы резания;  
 $C_p$  – постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов;  
 $K_p$  – поправочный коэффициент;  
 $V(\tau)$  – регулируемая (оптимальная) величина скорости резания;  
 $S(\tau)$  – регулируемая (оптимальная) величина подачи;  
 $r_b$  – радиус вершины лезвия реза.  
 $R_a$  – текущее значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;  
 $R_{a0}$  – исходное (заданное) значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;  
 $T_{гр}$  – машинное время, необходимое для завершения текущего прохода;  
 $L_{дет}$  – длина поверхности детали, обрабатываемая за один проход.

### ВВЕДЕНИЕ

Адаптивность (приспособляемость) управления лезвийной металлообработкой, выполняемой на станках с ЧПУ, обеспечивается за счет выбора по тем или иным алгоритмам оптимальных сочетаний трех управляемых параметров: глубины, подачи и скорости резания. Оптимум обеспечивается путем определения экстремума целевой функции, что позволяет достигать на данном станке в зависимости от решаемой задачи либо максимума производительности, либо минимума себестоимости получаемой при этом детали, либо поддержания граничного значения регулируемых параметров [1, 2].

При этом при всей развитости принятых алгоритмов адаптивного управления, существенной проблемой резания металлов является так и не решенная до сих пор задача эффективного контроля состояния режущего инструмента [3]. Действующие в настоящее время даже весьма прогрессивные методы прямого или косвенного контроля состояния инструмента ограничиваются лишь сравнением определенного тем или иным, порой весьма изощренным, способом фактической величины износа инструмента с его нормативной величиной [4].

Однако при этом не ставится задача прогнозирования наработки инструмента до момента достижения им своей предельно допустимой величины износа, что не позволяет заранее принимать решение об изменении режима обработки с целью предупреждения внезапного выхода инструмента из строя и исключения тем самым появления бракованной детали. Отсутствие подобного прогноза сводит на нет все усилия по разработке алгоритма адаптивного управления, каким бы эффективным, по желанию авторов, он ни был.

Отсутствие действенных методов прогнозирования ресурса инструмента отчасти объясняется тем, что даже знание фактической величины износа не позволяет с достаточной долей вероятности прогнозировать наработку инструмента до момента достижения предельно допустимой величины его износа. Это объясняется тем, что нормативная величина износа носит сугубо среднестатистический характер. По этой причине нормы износа только с определенной долей достоверности характеризуют фактически складывающиеся условия нагруже-

ния инструмента, определяемые конкретным сочетанием режимов резания и материалов как инструмента, так и заготовки.

Пронормировать непосредственно ресурс (стойкость) инструмента, исходя из условий его нагружения, так же не представляется возможным. Это объясняется тем, что в практике резания наблюдается не поддающееся нормированию бесконечное множество фактически реализующихся условий нагружения инструмента. Данные о ресурсе инструмента, приводимые их производителем, носят, так же как и нормы износа, среднестатистический характер, с малой долей вероятности, характеризующие индивидуальный ресурс инструмента, определяемый конкретно складывающимися условиями его эксплуатации. Результатом этой неопределенности является проявляющийся, на первый взгляд, как правило, внезапно, отказ инструмента, влекущий, в свою очередь, появление неисправимого брака детали.

Решение указанной проблемы потребовало разработки новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента, составившей основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом лезвийной обработки материалов. Новизна методологии прогнозирования ресурса инструмента заключается в том, что она в отличие от действующих методов, ориентирующихся на среднестатистические данные о предельном износе и ресурсе инструмента, обеспечивает прогнозирование в режиме реального времени индивидуального ресурса инструмента, отвечающего фактическим условиям его нагружения.

Разработка автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, основу которой составляет новая методология прогнозирования ресурса инструмента, является, несомненно, актуальной научно-практической задачей.

Предметом исследования является система адаптивного управления, основанная на прогнозе в режиме реального времени индивидуального ресурса режущего инструмента.

Целью работы является разработка алгоритма и отвечающего ему программного продукта, составляющего основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, обеспечивающей внедрение в практику машиностроительного производства новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При управлении металлообрабатывающими системами приходится иметь дело со случаем, когда математическая модель объекта управления известна не полностью, а динамические характеристики объекта, описываемые этой моделью, непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, обусловленных в данном случае изменением в процессе резания геометрии заготовки и контура лезвия инструмента по причине его износа [4].

В данном случае в качестве модели объекта управления предлагается рассматривать математическое описание тренда различных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих процесс резания, наибо-

лее информативным из которых является звук, генерируемый в точке контакта заготовки и инструмента [5].

Модель, описывающая поведение тренда звука, рассматриваемая в качестве модели динамического поведения обрабатываемой системы, позволила разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, составившую основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом обработки материалов резанием. Алгоритм управления, разработанный в соответствии с данной методологией, сочетает в рамках единого процесса решение задач идентификации и управления.

По результатам идентификации модели тренда в режиме реального времени прогнозируется индивидуальный ресурс инструмента. Далее, на основе сопоставления прогноза с требуемой по тех процессу длительностью обработки осуществляется выбор оптимального режима резания, позволяющего продлить период бездефектной эксплуатации инструмента, сведя практически к нулю вероятность появления дефекта изготавливаемой при этом детали.

При разработке алгоритма управления исходили из двух общеизвестных фактов, первое: определяющее влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывает износ лезвия режущего инструмента, в частности, износ по его задней главной поверхности  $h_3$ , второе: продолжительность бездефектной обработки детали определяется индивидуальным ресурсом инструмента  $T$ , реализующимся в данных условиях его нагружения. Предельно допустимая величина износа  $[h_3]$  и ресурс  $T$  связаны следующим соотношением [6]:

$$T = \frac{[h_3]}{V \cdot \gamma}. \quad (1)$$

Величина  $[h_3]$  стандартизирована ( $[h_3] = \text{const}$ ), поэтому управлять длительностью бездефектной эксплуатации инструмента (управлять его ресурсом  $T$ ), как следует из соотношения (1), можно осуществлять только за счет изменения режима резания (изменения скорости резания  $V$ ) и интенсивности износа  $\gamma$ . Целью варьирования этих параметров является соблюдение в процессе резания следующего условия:

$$T_{\text{ИНД}} \geq T_{\text{ТР}}. \quad (2)$$

Требуемая по техпроцессу длительность обработки  $T_{\text{ТР}}$  рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$T_{\text{ТР}} = \frac{\pi D \cdot L}{1000 \cdot V_0 \cdot S_0}. \quad (3)$$

Величина индивидуального ресурса инструмента  $T_{\text{ИНД}}$  определяется в процессе параметрической идентификации модели тренда звука, проводимой по результатам измерения в режиме реального времени уровня звука  $E_{3В}^{\Phi}$ , сопровождающего процесс резания [5]. При этом модель составлена таким образом, что искомым параметр  $T_{\text{ИНД}}$  входит в ее математическую структуру в каче-

стве одного из ее коэффициентов. Идентификация заключается в минимизации невязки (4) расчетных  $E_{3В}^P$  и фактических значений тренда (временного ряда)  $E_{3В}^{\Phi}$  звука:

$$U = \sum_i^k \left[ E_{3Вi}^{\Phi} - E_{3Вi}^P \right]^2. \quad (4)$$

Модель тренда звука описывается следующим выражением [8]:

$$E_{3В}^P = E_{3В0}^P \cdot \left( \frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ИНД}} - \tau} \right)^{\alpha}. \quad (5)$$

Отметим, что математическая структура модели тренда аналогична уравнению кривой усталости:

$$\sigma = \sigma_{-1} \cdot \left( \frac{N_6}{N} \right)^{1/m}. \quad (6)$$

Графики выражений (5) и (6) зеркальны (рис. 1).

Выражение (5) представляет собой дробно рациональную степенную функцию. Эта функция претерпевает разрыв при исчерпании ресурса инструмента, т.е. при выполнении следующего условия:

$$\tau = T_{\text{ИНД}}. \quad (6)$$

Интенсивность износа  $\gamma$  пропорциональна произведению усилия прижатия  $P_{\text{пр}}$ , действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения  $V_{\text{СК}}$  [6]. Применительно к резанию это условие запишется следующим образом:

$$\gamma \sim P_{\text{РЕЗ}} \cdot V. \quad (7)$$

В данном случае трущейся парой являются рабочие поверхности инструмента и поверхность резания на заготовке. Сила резания определяется по следующей формуле [7]:

$$P_{\text{РЕЗ}} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (8)$$

Составляющие силы резания  $P_{x,y,z}$  определяются по эмпирической степенной зависимости вида [9]:

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p. \quad (9)$$

Значения коэффициентов и показателей степеней, содержащихся в (9), приводятся в соответствующих справочниках [7].

Разделив обе части неравенства (2) на требуемую длительность обработки  $T_{\text{ТР}}$  с учетом выражений (1), (7), (9) и соблюдении условия  $t = \text{const}$ , получим

$$\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{\gamma(\tau)}{\gamma_0} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{P(\tau)V(\tau)}{P_0 V_0}. \quad (10)$$

Отняв от левой части равенства (10) его правую часть, и возведя получившееся при этом выражение в квадрат, получим выражение для целевой функции:

$$U = \left[ \frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} - \left( \frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2. \quad (11)$$

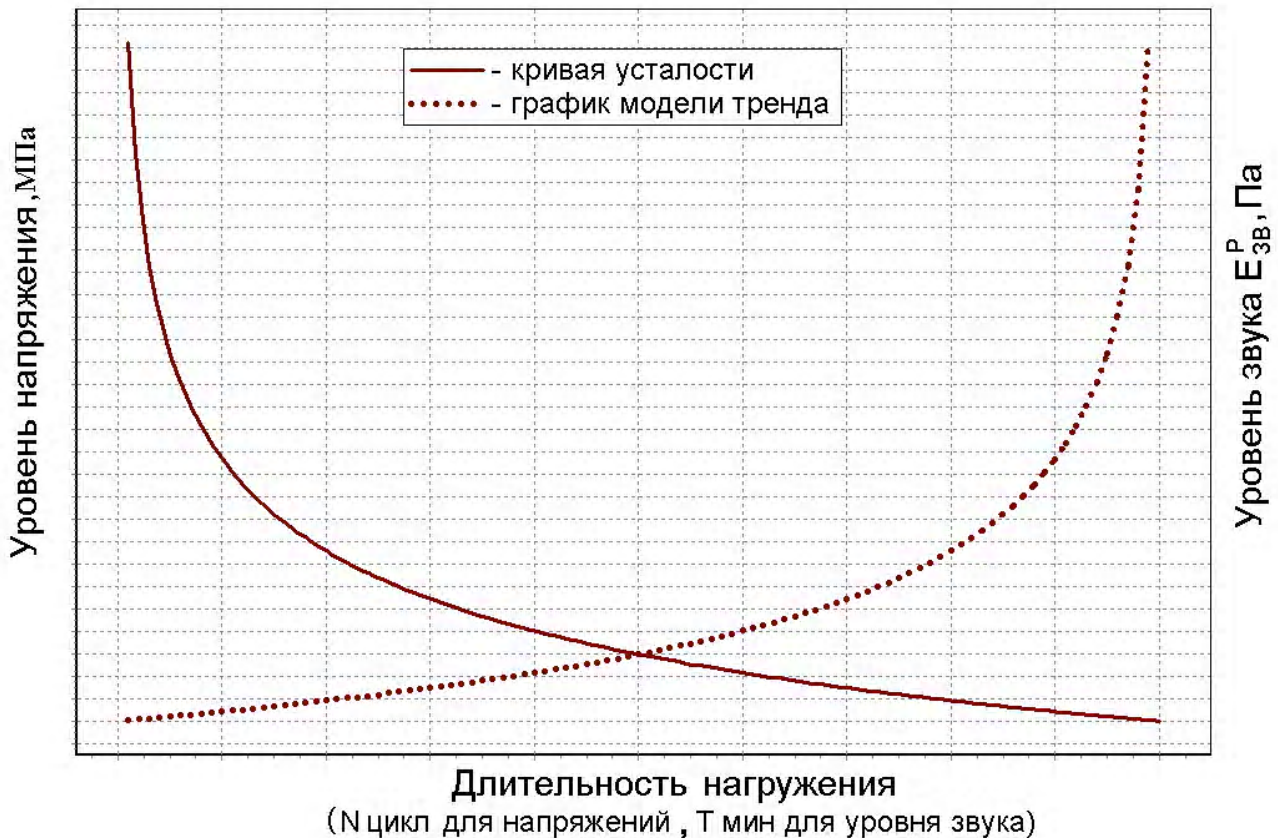


Рисунок 1 – Сравнение кривой усталости и графика модели тренда звука

Величина варьируемых параметров режима резания  $V(\tau)$  и  $P(\tau)$  выбирается из условия выполнения неравенства (2). При этом диапазон варьирования режимов резания ограничен степенью изменения силы резания. С учетом этого ограничения целевая функция (11) примет следующий вид:

$$U = \left[ \frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} - \left( \frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2 + \left[ 1 - \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2 \quad (12)$$

Адаптивное управление режимом лезвийной обработки осуществляется по следующему алгоритму:

- по принятой в технологии обработки металлов резанием методике [7] и в зависимости от класса адаптивной системы (система оптимизации или граничного регулирования) назначается исходный режим обработки, т. е. задаются исходные величины управляющих параметров:  $t_0$ ,  $S_0$ ,  $V_0$ ;

- в режиме реального времени измеряется уровень звука  $E_{3B}^{\Phi}$ , генерируемого процессом резания, и по результатам этих измерений осуществляется идентификация модели тренда, в число определяемых при этом параметров модели входит и численное значение искомого ресурса инструмента  $T_{\text{инд}}$ ;

- если ресурс инструмента превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т.е. выполняется условие  $T_{\text{инд}} > T_{\text{ТР}}$ , то возможны два варианта развития событий:

- если резание осуществляется в условиях единичного или мелкосерийного производства дорогостоящих изделий, то резание продолжается на исходном режиме;

- если резание осуществляется в условиях серийного производства недорогостоящих деталей, то возможно форсирование (ужесточение) режимов резания с целью повышения производительности (решение принимает оператор);

- если же наблюдается соотношение  $T_{\text{инд}} < T_{\text{ТР}}$ , то для обоих типов производств режим резания изменяется таким образом, чтобы выполнить условие (2).

Причем при обработке длинномерных объектов требуемый ресурс  $T_{\text{ТР}}$  принимается равным времени, необходимым для завершения текущего прохода  $T_{\text{ТР}} (T_{\text{ТР}} = T_{\text{ПР}})$ .

$$T_{\text{ПР}} = \pi D \cdot \frac{L_{\text{ДЕТ}}}{1000 \cdot S(\tau) V(\tau)} \quad (13)$$

Для автоматизации системы адаптивного управления процессом резания, воспроизводящей данный алгоритм, основанный на новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, в дополнение к штатной системе ЧПУ станка был разработан специальный аппаратно-программный комплекс.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При металлообработке уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки. Другими словами, насколько изменяются: припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость обрабатывающей системы, износ инструмента и его ресурс, принятые при расчете и составлении техпроцесса и управляющей программы [1, 2].

В настоящее время работа большинства автоматизированных станков подчиняется «жесткому» программированию, ориентирующемуся на среднестатистические данные (нормы) износа инструмента и его стойкости [10–18]. Так, например, в зависимости от качества режущего инструмента его ресурс в одной партии колеблется от 15 до 35% от среднего значения. Если же время работы инструмента определяется худшим образцом в партии, то наиболее устойчивые образцы при фиксированной наработке используют свой ресурс, в лучшем случае, только на 65% [4]. При этом под ресурсом в соответствии с [9] понимается временной ресурс, равный наработке режущего инструмента от начала резания новым инструментом до достижения им предельного состояния.

По причине нестабильности ресурса инструмента основная часть процесса резания протекает либо с недоиспользованием возможностей режущего инструмента, либо не исключает появление брака детали из-за непредвиденного отказа инструмента [9]. Для борьбы с этими отказами предусматривается принудительная замена инструмента, в результате этого он снимается с эксплуатации преждевременно, имея существенный запас ресурса [10].

Контроль же состояния инструмента непосредственно в процессе резания с целью определения степени его критичности, а соответственно, и для прогнозирования его наработки до замены, является достаточно сложным процессом. Так, например, измерение износа лезвийного режущего инструмента надо проводить после каждого цикла обработки [19], но в этом случае сложно прогнозировать наступление критического состояния инст-

румента: предельного износа, выкрашивания, скола, поломки, а, тем более, осуществлять долгосрочные прогнозы для определения момента его замены. Подобный контроль требует, как правило, прерывания процесса обработки, что существенно снижает ее эффективность. Поэтому для оперативной диагностики нередко применяют косвенные методы, в частности, контролируют состояние инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания [5].

Общим недостатком действующих методов прогнозирования, основанных на среднестатистических по природе нормативных величинах, является то, что они приводят к существенным погрешностям прогноза, что делает невозможным применение их при адаптивном управлении процессом резания.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм адаптивного управления послужил основой для разработки программно-аппаратного комплекса (рис. 3). Программная часть комплекса отражает новую методологию прогнозирования ресурса инструмента и обеспечивает выбор оптимальных режимов резания, позволяющих продлить период бездефектной обработки заготовки. Программный продукт, построен по модульному принципу (рис. 2).



Рисунок 2 – Модули, из которых состоит программная часть

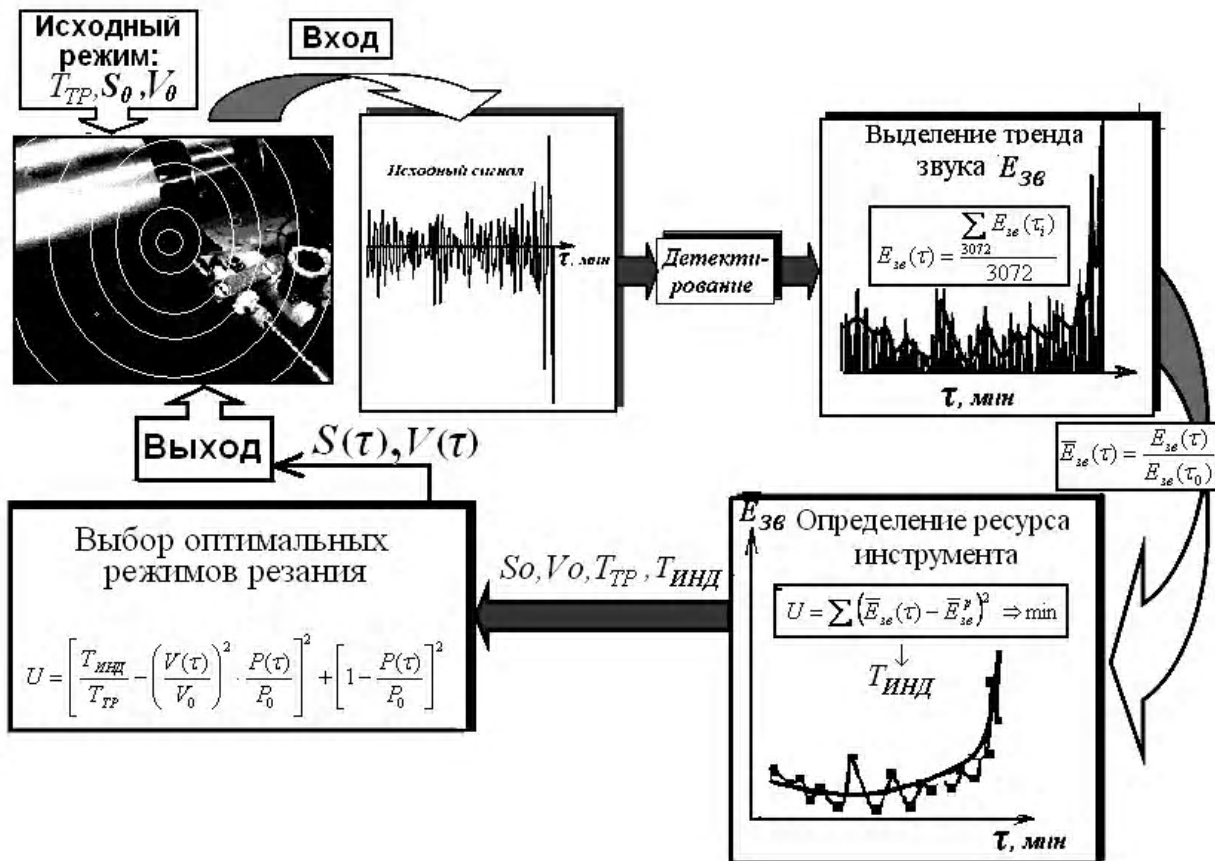


Рисунок 3 – Визуализация алгоритма функционирования программно-аппаратного комплекса

Модульний принцип побудови програмного продукту дозволяє гнучко змінювати його структуру применливо до особливостей підконтрольного об'єкта. Для забезпечення універсальності програмного комплексу по відношенню до апаратних засобів (рис. 3) він реалізований на кількох алгоритмічних мовах: Турбо Паскаль, Делфі, Сі і JAVA. Останній варіант комплексу розрахований на мікропроцесорні пристрої, що працюють на платформі Android.

Алгоритм функціонування комплексу в наглядній формі представлений на рис. 3. Комплекс забезпечує: реєстрацію, накопичення, обробку інформації і адаптивне управління на основі цього роботою підконтрольного обладнання. Відповідно до алгоритму функціонування програмно-апаратного комплексу його робота (рис. 3) починається з введення вихідних даних: режимів різання і геометричних параметрів заготовки і деталі, на основі яких розраховується необхідна тривалість роботи оброблюваної системи ( $T_{\text{тр}}$ ).

Далі проводиться реєстрація амплітуди звукової хвилі і прогнозування індивідуального ресурсу ( $T_{\text{інд}}$ ) інструмента. Якщо прогнозоване значення ресурсу перевищує необхідне ( $T_{\text{інд}} > T_{\text{тр}}$ ), то обробка деталі продовжується на старих режимах. В протилежному випадку розраховуються режими роботи, що забезпечують виконання умови ( $T_{\text{інд}} \geq T_{\text{тр}}$ ).

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність роботи автоматизованої системи адаптивного управління була перевірена в процесі токарної обробки заготовки на станку 16К20Т1, оснащеному ЧПУ. Кінематична схема станка дозволяє змінювати обороти шпинделя  $n$  на III режимі його роботи від 125 об/хв до 2000 об/хв, подачу  $S$  можна змінювати з кроком 0,01 мм/об від 0,01 до 2,8 мм/об.

Заготовка підвергалася полувисхідній обробці різцем з режущою пластинкою з твердого сплаву Т15К6 на наступних вихідних режимах:  $V_0 = 63$  м/хв, ( $n = 100$  об/хв),  $S_0 = 0,5$  мм/об,  $t_0 = 1,0$  мм. Режими вибиралися згідно з вимогами довідника [7]. Довжина деталі становила 310 мм, кількість проходів рівнялось трьом, діаметр заготовки становив 200 мм, а деталі – 194 мм. Показники степеней в формулі (9) мали наступні значення:  $n_{P_x} = -0,4$  (для  $P_x$ );  $n_{P_y} = -0,3$  (для  $P_y$ ),  $n_{P_z} = -0,15$  (для  $P_z$ );  $y_{P_x} = 0,2$  (для  $P_x$ ),  $y_{P_y} = 0,8$  (для  $P_y$ ),  $y_{P_z} = 0,9$  (для  $P_z$ ). Необхідна по технології тривалість обробки (машинне час)  $T_{\text{тр}}$  становила 18,6 хв.

Контроль звуку здійснювався неперервно в процесі обробки деталі з допомогою мікрофона, встановленого поблизу зони різання [5]. Сигнал з мікрофона (рис. 3) подавався на «звукову карту» комп'ютера, де підвергалася оцифровці і подальшій обробці. Згідно з викладеним вище алгоритмом адаптивного управління процесом різання по результатам обробки звукового сигналу прогнозувався індивідуальний ресурс інструмента  $T_{\text{інд}}$ , і вибиралося, шляхом мінімізації цільової функції (12), оптимальне поєднання керуючих параметрів (швидкості різання  $V(\tau)$  і продольної подачі  $S(\tau)$ , що забезпечують виконання умови (2).

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експерименту наведені на рис. 4 і 5. На рис. 4 показано співвідношення між необхідною по технології тривалістю обробки деталі  $T_{\text{тр}}$  і прогнозованим індивідуальним ресурсом  $T_{\text{інд}}$  інструмента, що відповідає навантаженню інструмента на вихідних режимах ( $V_0$  і  $S_0$ ) різання.

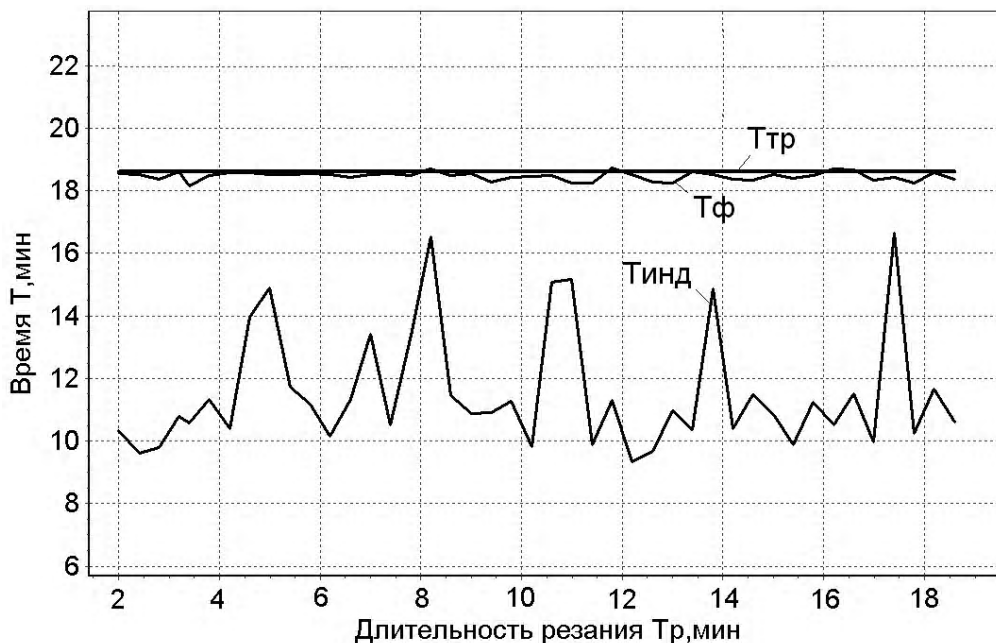


Рисунок 4 – Сопоставление требуемой длительности резания  $T_{\text{тр}}$  с прогнозом индивидуального ресурса инструмента  $T_{\text{інд}}$  и его скорректированным значением  $T_{\text{ф}}$

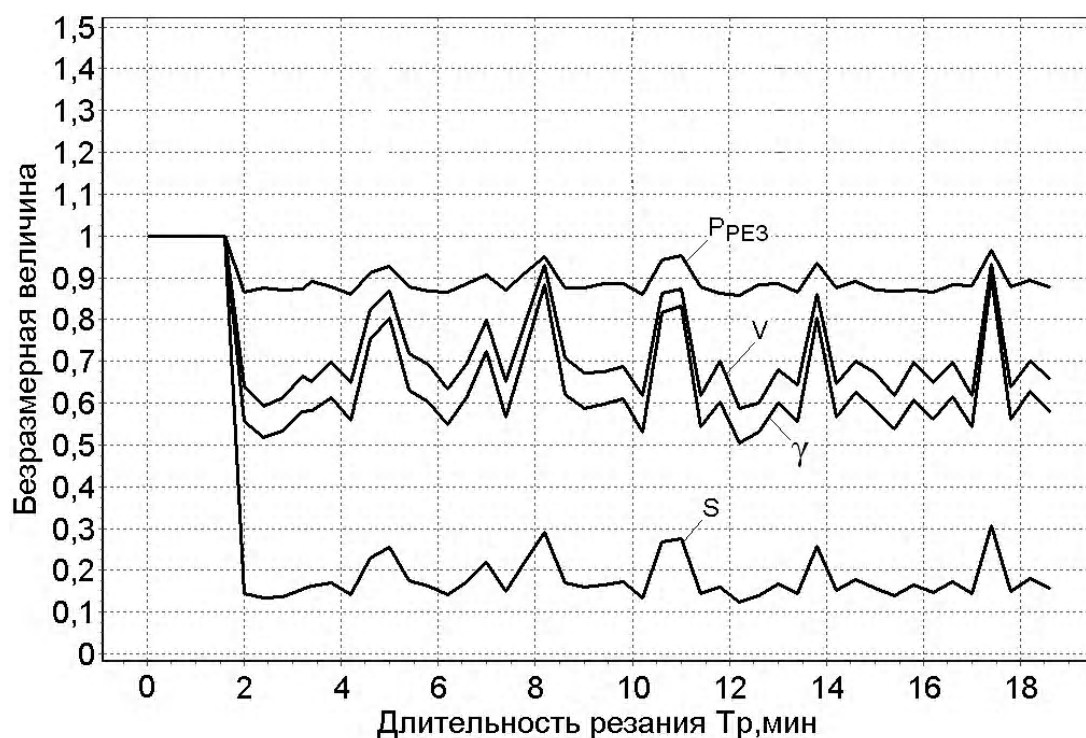


Рисунок 5– Изменение в процессе адаптивного управления регулируемых параметров  $V(\tau)$ ,  $S(\tau)$ , а так же силы резания  $P_{РЕЗ}$  и интенсивности износа  $\gamma$

На рис. 5 приведены фактически реализованные режимы резания ( $V(\tau)$  и  $S(\tau)$ ), позволившие завершить обработку детали без замены инструмента и обеспечить тем самым выполнение в процессе резания условия (2). Фактически реализованная при этом длительность бездефектной обработки (скорректированное значение ресурса инструмента)  $T_{\phi}$  приведена на рис. 4.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент показал, что в процессе обработки детали прогноз индивидуального ресурса  $T_{инд}$  не превышает требуемой по техпроцессу длительности обработки  $T_{тр}$  (рис. 4), т.е. условие (2) не выполнялось. При этом индивидуальный ресурс в среднем равнялся 12 мин, что составляло, порядка, 67% от требуемой длительности обработки. Для компенсации этого несоответствия потребовалось уменьшить соответственно на 33% интенсивность износа инструмента (рис. 5). Уменьшение интенсивности износа было обеспечено за счет уменьшения, порядка, на 30% скорости резания  $V$  и, в среднем, на 80% подачи. Изменение режимов резания привело к уменьшению, в среднем, на 10% силы резания  $P_{РЕЗ}$  (рис. 5), в результате чего уменьшилась нагрузка на инструмент, способствующая, наряду с уменьшением скорости резания и подачи, продлению его ресурса и, соответственно, периода бездефектной обработки детали. Эксперимент показал, что наибольшему изменению подверглась подача  $S$ , оказывающая наиболее существенное влияние при неизменной глубине резания  $t$  на интенсивность износа инструмента (интенсивность его нагружения).

## ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача по разработке автоматизированной системы адаптивного управления

резанием, программное обеспечение которой впервые в практике управления станками с ЧПУ реализует новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента. Данная методология не предусматривает использование средне статистических по природе нормативных величин износа и ресурса (стойкости) инструмента. Методология предусматривает прогноз индивидуального ресурса инструмента, что обеспечивает эксплуатацию инструмента, исходя из его фактического состояния. Это позволяет избежать в практике резания в равной степени не желательные, как внезапный отказ инструмента, так и его преждевременную замену и соответственно предупреждать появление непредвиденного брака при изготовлении изделия.

Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике управления объектами, математическая модель которых известна не полностью, а характеристики объекта не постоянны и непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, удалось разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, послужившую основой для разработки автоматизированной системы адаптивного управления резанием. Алгоритм управления предусматривает сочетание в рамках единого процесса решение задач идентификации и управления. По результатам идентификации модели объекта, в качестве которой рассматривается модель тренда звука, сопровождающего процесс резания, определяется индивидуальный ресурс режущего инструмента, знание которого позволяет гибко варьировать режим резания с целью продления в заданных пределах срок бездефектной эксплуатации инструмента.



Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке программного продукта и создании на основе этого программно-аппаратного комплекса, позволившего внедрить в практику резания в виде автоматизированной системы адаптивного управления резанием новую методологию прогнозирования ресурса рабочего органа технологических металлообрабатывающих систем.

Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования и служащих основой для прогнозирования согласно рассмотренной в статье новой методологии их индивидуального ресурса, отвечающего фактически складывающимся условиям их эксплуатации.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Сумского государственного университета «Моделі та інформаційні технології проектування і управління в складних системах» (номер государственной регистрации 0115U001569).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаптивное управление станками : монография / [Б. С. Балакшин, Б. М. Бозров, И. М. Баранчукова, В. П. Вороненко и др.], под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
2. Никитина Л. Г. Адаптивное управление станками / Л. Г. Никитина // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 3. – С. 61–64.
3. Koren Y. Adaptive Control Systems for Machining / Y. Koren // Manufacturing Review. – 1989. – Vol 2, № 1. – P. 6–15.
4. Бибики В. Л. Методы прогнозирования долговечности режущих инструментов [Электрон. ресурс] / В. Л. Бибики. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=28853>.
5. Залогова В. А. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : монография / В. А. Залогова, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный. – Сумы : Изд-во Сумского гос. ун-та, 2016. – 241 с.
6. Проников А. С. Надежность машин : монография / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя / [В. Б. Борисов, Е. И. Борисов, В. Н. Васильев и др.]; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.
8. Красножон Г. И. Определение ресурса и оценка технического состояния промышленного оборудования / Г. И. Красножон, В. В. Нагорный // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – 2007. – № 4(11). – С. 38–42.
9. Основы теории резания материалов: учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]; под ред. Н. П. Мазура, А. И. Грабченко. – 2-е изд. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
10. Мустафаев Г. А. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станке с ЧПУ / Г. А. Мустафаев, Е. В. Сидорчик // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 60–62.
11. Шарабура С. Н. Система адаптивного управления процессом обработки деталей на станках с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. Н. Шарабура, В. В. Шевченко. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/>.
12. Васильев С. В. ЭДС и температура резания / С. В. Васильев // Станки и инструмент. – 1980. – № 10. – С. 20–22.
13. Остафьев В. А. Адаптивная система управления / В. А. Остафьев, Г. С. Тымчик, В. В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – № 1. – С. 18–20.
14. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании : монография / С. Н. Постников. – Горький : Волго-Вят.кн.изд-во, 1975. – 280 с.
15. Ярута С. П. Принципы создания систем адаптивного контроля технологических процессов для станков с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. П. Ярута, П. А. Усачев. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/04/11652>.
16. Inamura T. Computer control of chattering in turning operation / T. Inamura, T. Senda, T. Sata // Annals of the CIRP. – 1977. – (1). – P. 181–186.
17. Donahue E. J. Applications of adaptive control in the aerospace industry / E. J. Donahue // SME Paper. – 1976. – No. MS 76. – P. 274.
18. Yen D. W. Adaptive control in machining – A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms / D. W. Yen, P. K. Wright // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1983. – № 105 (1). – P. 31–38.
19. Чистяков А. В. Оптимизация эксплуатационно-технологических процессов в машиностроении / А. В. Чистяков, В. И. Бутенко, А. Я. Гоголев. – Новочеркасск : изд-во НГТУ, 1997. – 228 с.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2017.

Після доробки 13.03.2017.

Нагорный В. В.

Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна

### АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСУ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

**Актуальність.** У статті викладені результати досліджень по розробці нової методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту, яка стала підґрунтям автоматизованої системи управління роботою металообробного обладнання. Прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту є злободенною, але так і не вирішеною до сих пір проблемою, що і визначає актуальність викладеного в статті матеріалу.

**Метою роботи** є розробка методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту і реалізація її в практиці управління різанням у вигляді алгоритму і програмного продукту, що склали основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем.

**Метод.** Управління цих систем передбачає поєднання в рамках єдиного процесу вирішення завдань ідентифікації та управління. Ідентифікації піддається модель тренда інформаційного сигналу, що генерується в процесі роботи обробної системи, яка використовується в якості моделі, яка описує динаміку піднаглядного обладнання. За результатами прогнозування індивідуального ресурсу інструменту і зіставлення його з необхідною тривалістю механічної обробки, приймається рішення про варіюванні величин параметрів, що управляють (подачі і обертів шпинделя), та забезпечують реалізацію на новопризначених режимах необхідного періоду бездефектної експлуатації інструменту.

**Результати.** Розроблено програмний продукт, що склав основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем, алгоритм роботи яких відображає запропоновану методологію прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованої методології прогнозування ресурсу ріжучого інструменту і працездатність апаратно-програмного комплексу, що реалізує дану методологію в практиці різання. Наукова новизна викладе-



них в статті результатів досліджень полягає в тому, що вперше в практиці машинобудування удалося розробити абсолютно нову методологію прогнозування індивідуального ресурсу робочого інструмента, що дозволяє цілеспрямовано керувати тривалістю перебігу технологічного процесу, орієнтуючись на фактичний технічний стан основного елемента технологічної системи. Практична значимість отриманих результатів полягає в створенні програмно-апаратного комплексу, що автоматизує процес адаптивного управління режимами різання і містить програмне забезпечення, яке відображає алгоритм нової методології прогнозування індивідуального ресурсу інструменту. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні універсальної системи контролю будь-якого технологічного обладнання, робота якого супроводжується генеруванням різних за фізичною природою інформаційних сигналів, що об'єктивно відображають ступінь критичності технічного стану піднаглядного обладнання.

Впровадження подібної методології контролю не тільки в процес виготовлення, а й в умови експлуатації різних за конструкцією та призначенням машин і механізмів, вирішує проблему визначення індивідуального ресурсу технічних систем, яка давно стоїть на порядку денному, що і визначає цінність проведених досліджень і їх помітний внесок в науку управління.

**Ключові слова:** автоматизація, адаптивне управління, індивідуальний ресурс, програмний продукт, обробка різанням, обробні системи, прогноз ресурсу, ідентифікація, тренд інформаційного сигналу, математична модель, період бездефектної обробки.

Nahorny V. V.

PhD., Senior Lecturer of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine

#### **AUTOMATED CONTROL CUTTING BASED PREDICTION OF INDIVIDUAL LIFE OF THE CUTTING TOOL**

**Context.** The article presents the results of research to develop a new methodology for the prediction of individual life of the cutting tool, which served as the basis for the automated operation of the control system of the metal cutting equipment. Predictions of individual life of the cutting tool is topical, but have not solved the problem so far, and this determines the relevance of the material contained in the article.

**Objective.** The goal of the work was to develop a methodology for forecasting the individual life of the cutting tool and implementing it in practice by cutting the control algorithm and software, which formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems.

**Method.** The method provides for control of these systems in a single combination of process control solutions and identification tasks. Identification information signal subjected to the trend model generated during operation of the processing system, which is used as a model, describing the dynamics of the supervised equipment. As a result of the prediction of individual life of the cutting tool and compare it with the desired duration of mechanical treatment, a decision on the variation of the values of the control parameters (feed and spindle speed) to ensure the implementation of the newly appointed regimes required period of faultless operation of the tool.

**Results.** Developed software product that formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems. The algorithm of the control systems reflects the proposed methodology for the prediction of individual life of the cutting tool.

**Conclusions.** The experiments confirmed the effectiveness of the proposed methodology for the prediction of the cutting tool life and performance of hardware and software that implements this methodology in practice cutting. Scientific novelty research is that for the first time in the practice of engineering develops a completely new control methodology for forecasting the individual life of the cutting tool, that allows you to specifically control the duration of the technological process, focusing on the actual technical condition of the main elements of the technological system.

The practical significance of the results is to create a hardware and software system that automates the process of adaptive management of cutting conditions and containing the software algorithm that reflects the new methodology for predicting an individual resource tool. Prospects for further research consists in the creation of a universal system of control of any process equipment, the operation of which is accompanied by the generation of different physical nature of the information signals, objectively reflecting the degree of criticality of the technical condition of the equipment under supervision. The introduction of such a monitoring methodology not only in the manufacturing process, but also in terms of exploitation of different machines determines the value of the research and their significant contribution to the science of control.

**Keywords:** automation, adaptive control, an individual resource, software, machining, processing system, prediction of individual life, identification, trend information signal, a mathematical model, the period of defect-free processing, the state of supervised equipment.

#### **REFERENCES**

1. Balakshin B. S., Bozrov B. M., Baranchukova I. M., Voronenko V. P. i dr. pod red. B. S. Balakshina. *Adaptivnoe upravlenie stankami : monografiya*, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 688 p.
2. Nikitina L. G. *Adaptivnoe upravlenie stankami, Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2011, No. 3, pp. 61–64.
3. Koren Y. *Adaptive Control Systems for Machining, Manufacturing Review*, 1989, Vol 2, No. 1, pp. 6–15.
4. Bibik V. L. *Metodyi prognozirovaniya dolgovechnosti rezhuschih instrumentov [Elektron. resurs]*. Rezhim dostupa: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=28853>.
5. Zaloga V. A., Nagornyy V. M., Nagornyy V. V. *Kontrol dinamicheskogo sostoyaniya metalloobrabatyvayushey tehnologicheskoy sistemy i prognozirovanie ee resursa : monografiya*. Sumy, Izd-vo Sumskogo gos. un-ta, 2016, 241 p.
6. Pronikov A. S. *Nadezhnost mashin : monografiya*. Moscow, Mashinostroenie, 1978, 592 s.
7. Borisov V. B., Borisov E. I., Vasilev V. N. i dr.; pod red. Kosilovoy A. G., Mescheryakova R. K. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya*. 4-e izd. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 656 p.
8. Krasnozhan G. I., Nagornyy V. V. *Opreделение resursa i otsenka tehnikeskogo sostoyaniya promyshlennogo oborudovaniya, Vibratsiya mashin. Izmerenie, snizhenie, zaschita*, 2007, No. 4(11), pp. 38–42.
9. Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. i dr.; pod red. Mazura N. P., Grabchenko A. I. *Osnovyi teorii rezaniya materialov: uchebnik*, 2-e izd. Har'kov, NTU «HPI», 2013, 534 p.
10. Mustafayev G. A., Sidorchik E. V. *Ispolzovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detaley na stanke s ChPU, Molodoy uchenyy*, 2013, No. 9, pp. 60–62.
11. Sharabura S. N., Shevchenko V. V. *Sistema adaptivnogo upravleniya protsessom obrabotki detaley na stankah s ChPU [Elektron. resurs]*, Rezhim dostup: <http://web.snauka.ru/issues/2014>.
12. Vasilev S. V. *EDS i temperatura rezaniya, Stanki i instrument*, 1980, No. 10, pp. 20–22.
13. Ostafev V. A., Tyimchik G. S., Shevchenko V. V. *Adaptivnaya sistema upravleniya, Mehanizatsiya i avtomatizatsiya upravleniya*, 1983, No. 1, pp. 18–20.
14. Postnikov S. N. *Elektricheskie yavleniya pri trenii i rezanii : monografiya*. Gorkiy, Volgo-Vyat.kn.izd-vo, 1975, 280 p.
15. Yaruta S. P., Usachev P. A. *Printsiipy sozdaniya sistem adaptivnogo kontrolya tehnologicheskikh protsessov dlya stankov s ChPU [Elektron. resurs]*. Rezhim dostupa: <http://web.snauka.ru/issues/2012>.
16. Inamura T., Senda T., Sata T. *Computer control of chattering in turning operation, Annals of the CIRP*, 1977, (1), R. 181–186.
17. Donahue E. J. *Applications of adaptive control in the aerospace industry, SME Paper*, 1976, No. MS 76, P. 274.
18. Yen D. W., Wright P. K. *Adaptive control in machining –A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms, ASME Journal of Engineering for Industry*, 1983, No. 105 (1), pp. 31–38.
19. Chistyakov A. V., Butenko V. I., Gogolev A. Ya. *Optimizatsiya ekspluatatsionno-tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii*. Novocherkassk, izd-vo NGTU, 1997, 228 p.