

## Прогнозирование ресурса режущего инструмента

В. А. Залогов<sup>1)</sup>, В. В. Нагорный<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

### Article info:

Paper received:

02 December 2014

The final version of the paper received:

30 January 2015

Paper accepted online:

05 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> zalogav@gmail.com

<sup>2)</sup> potti89@mail.ru

В статье рассматривается один из вариантов решения ключевой проблемы обработки материалов резанием – прогнозирования ресурса режущего лезвийного инструмента и разработки на этой основе нового метода диагностирования степени критичности его технического состояния, что и предопределило актуальность представленного в статье материала. При этом под ресурсом понимается период стойкости инструмента между переточками, т. е. длительность эксплуатации инструмента, не требующего перезаточки, наиболее просто поддается автоматическому контролю.

Целью исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, является создание метода прогнозирования ресурса режущего инструмента, основывающегося на непрерывном контроле в процессе резания величины давления звука, сопровождающего обработку резанием.

В процессе исследований были использованы методы: системного анализа, теории резания, теории колебаний и идентификации, выполняемой методом случайного поиска.

В результате проведенных исследований разработан метод прогнозирования ресурса режущего инструмента, основывающегося на идентификации параметров прогнозной модели по результатам непрерывного контроля величины давления звука, сопровождающего процесс резания. Причем модель составлена таким образом, что искомый ресурс включен в ее математическую структуру, что позволяет исключить использование при прогнозировании статистически ненадежных критериальных параметров, описывающих предельное состояние инструмента.

**Ключевые слова:** контроль, диагностирование, качество изготовления, прогноз наработки, показатель состояния.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении значительное место занимает обработка деталей резанием, качество которой зависит от прогрессивности задействованных технологических процессов, степени их механизации и автоматизации. При этом одной из наиболее важных задач автоматизированного производства является диагностирование технического состояния одной из основных составляющих производства – металлообрабатывающей технологической системы. Основной функцией диагностического контроля является оценка степени критичности текущего состояния режущего инструмента, которая наиболее эффективно осуществляется на основе прогнозирования фактического ресурса инструмента. Знание фактического ресурса позволяет избегать незапланированных простоев оборудования, связанных с заменой бракованной детали и внезапно отказавшего режущего инструмента.

## 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обеспечение эффективности процесса металлообработки невозможно без информации о непрерывно изменяющемся состоянии режущего инструмента. 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 % [1]. При этом под ресурсом в соответствии с [2] понимается наработка режущего инструмента от начала резания новым инструментом до достижения им предельного состояния. Причем среди различных характеристик ресурса (временной, массовой, путевой, поверхностный, объемный, штучный) выбран временной ресурс.

Контроль 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 [3], но в этом случае сложно прогнозировать наступление критического состояния инструмента: 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.

Без своевременной же информации о фактическом ресурсе режущего инструмента существенно усложняется как оптимизация процесса резания, так и предотвращение брака. Поэтому для оперативной диагностики нередко применяют косвенные методы, в частности контролируют состояние инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания [4].

К настоящему времени удалось выявить физические процессы, сопровождающие процессы резания, и установить перечень их параметров, адекватно реагирующих на изменение состояния режущего инструмента [5], разработать методики измерения этих параметров и последующей обработки результатов зарегистрированной информации [6, 7]. Однако, несмотря на это, проблема создания системы оперативного прогнозирования ресурса режущего инструмента в необходимом объеме все еще остается практически нерешенной.

Это объясняется тем, что действующие методы прогнозирования и диагностики имеют ряд недостатков:

во-первых, они основываются на сравнении диагностического признака с определенным эталоном, который, в принципе, не может иметь место т. к. сочетаний таких элементов обрабатываемой системы, как заготовка и инструмент, достаточно большое, не поддающееся статистической обработке, количество. Это не позволяет говорить о каком-либо даже среднестатистическом по характеристикам эталоне, хотя решение данной проблемы находится достаточно просто – эталоном для каждой пары «заготовка-инструмент», на самом деле, является она сама;

во-вторых, при диагностировании пытаются оценивать степень критичности состояния инструмента на основании текущих измерений контролируемых параметров, не учитывая результаты предыдущего контроля (предысторию нагружения), что приводит к значительным ошибкам прогнозирования, дискредитирующим саму идею оперативного контроля состояния инструмента. Последнее, кстати, является одной из основных причин отсутствия до сих пор эффективной системы прогнозирования ресурса режущего инструмента.

Так, в работе [8] получено уравнение регрессии, позволяющее для заданного режима резания и заданной величины износа прогнозировать ресурс режущего инструмента из КНТ16 при чистовом точении детали из сплава прецизионного магнитно-мягкого марки 50 Н (пермаллой).

$$T = -18,21 + 0,099 V + 1100,062 S - 405,06 h_3 - 0,00031 V^2 - 5367,63 S^2 + 6405,19 h_3^2 - \\ -13,4 V \cdot S + 2,56 V \cdot h_3 - 23872 S \cdot h_3 + 0,034 V^2 \cdot S - 0,0064 V^2 \cdot h_3 + 76,59 V \cdot S^2 + 104536,3 S^2 \cdot h_3 - \\ -0,19 V^2 \cdot S^2 + 219,53 V \cdot S \cdot h_3 - 1254,44 V \cdot S^2 \cdot h_3 - 0,55 V^2 \cdot S \cdot h_3 + 3,14 V^2 \cdot S^2 \cdot h_3.$$

Уравнение подтверждает общеизвестный факт доминирующего влияния на ресурс инструмента скорости резания  $V$  и подачи  $S$ . Как видим, эмпирические формулы, аргументами которых являются режимы резания, имеют, порой, весьма сложный характер. Для упрощения их выражений и соответственно для повышения надежности прогноза предлагается использовать характеристики физических процессов, сопровождающих процесс резания.

В [9] прогнозное значение ресурса определяют по следующей зависимости:

$$T = T_{ЭТ} \frac{V}{V_{ЭТ}},$$

где  $T$  – среднее прогнозируемое время безаварийной работы твердосплавных режущих инструментов, подвергающихся испытаниям, из текущей партии образцов (период стойкости), мин;  $T_{ЭТ}$  – средний период ресурса для твердосплавных режущих инструментов из эталонной партии твердого сплава;  $V_{ЭТ}$  и  $V$  – средние величины скорости резания, полученные при измерении характеристики поверхностной полиоксидной структуры у твердосплавных режущих инструментов соответственно в эталонной и контролируемой партиях твердосплавных пластин.

Согласно [10] прогноз ресурса определяют по следующей зависимости:

$$T = \frac{h_{ПР} - h_{ПРИР}}{K},$$

где  $h_{ПР}$ ,  $h_{ПРИР}$  – оценка величины износа соответственно в текущий момент времени и смещение линейной функции аппроксимации);  $K$  – коэффициент наклона линейной функции аппроксимации ( $K = \operatorname{tg}(\alpha_{СРЕД})$ ).

В [11] прогнозирование ресурса инструмента предлагается осуществлять по величине сигнала акустической эмиссии, регистрируемого в два характерных момента поведения кривой, описывающей изменение амплитуды сигнала в зависимости от времени. Расчет ресурса проводится по следующей формуле:

$$T = \tau_{II} + \frac{\tau_H - \tau_{II}}{A_H - A_{II}} (A_K - A_{II}),$$

где  $\tau_{II}$  – время первого замера на втором экстремуме графика сигнала акустической эмиссии;  $\tau_H$  – время второго замера;  $A_{II}$  – амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго экстремума графика акустической эмиссии;  $A_H$  – амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго замера амплитуды акустической эмиссии;  $A_K$  – амплитуда сигнала

акустической эмиссии, соответствующая критическому износу инструмента.

Следует отметить, что рассмотренные выше методы прогноза рассчитаны на проведение прогноза ресурса инструмента в лабораторных условиях с научно-исследовательской целью. Условия лаборатории, естественно, весьма далеки от условий реального производства, что существенно затрудняет перенос получаемых там результатов в реальное производство.

Общим недостатком этих методов прогнозирования является то, что они приводят к существенным погрешностям прогноза, во-первых, из-за весьма сложного и во многом искусственного характера предлагаемых зависимостей, требующих регистрации множества исходных для расчета данных и, во-вторых, не позволяют учесть индивидуальные особенности технологических условий, в которых протекает контролируемый в текущий момент времени процесс резания.

### 3. ЦЕЛЬ, ПРЕДМЕТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований являлась разработка метода диагностирования динамического состояния лезвийного режущего инструмента, выполняемого на основе прогнозирования в режиме реального времени его фактического ресурса.

Предметом исследований был процесс продольного точения, осуществлявшийся на токарно-винторезном станке типа 16К20Т1. Материалом заготовки длиной 250 мм и диаметром 100 мм являлась конструкционная легированная сталь 40Х. Заготовка находилась в состоянии поставки и предварительной термообработке не подвергалась. Твердость заготовки 165 НВ.

Методика исследований заключалась в аппроксимации тренда давления звука [12], сопровождающего обработку резанием, графиком прогнозной модели. В процессе аппроксимации определяются (идентифицируются) параметры прогнозной модели, в том числе и искомый ресурс инструмента как один из ее параметров. В связи с тем, что исходные для расчета данные получены при обработке конструкционной легированной стали, был принят соответствующий этим сталям классический закон изменения износа режущего инструмента во времени (рис. 1) [3, 13].

В точке А кривой заканчивается участок приработки инструмента (износ  $h_{зпр}$ ) и начинается участок нормального (линейного) износа. Этот участок заканчивается в точке В, где инструмент достигает оптимального по технологическому критерию износа  $h_{зонн}$ . Далее начинается участок, предшествующий

катастрофическому износу (рис. 1, участок ВВ1), в конце которого износ инструмента достигает предельно допустимой величины  $h_{знд}$ , что требует прекращения процесса резания. Работа инструмента на участке В1С нецелесообразна [3] и даже недопустима, т. к. износ инструмента достигает недопустимой величины  $h_{знд}$  [3, 14], что может привести к поломке инструмента и даже к аварии в условиях безлюдного автоматизированного производства при достижении длительности обработки  $T_{ав}$ .

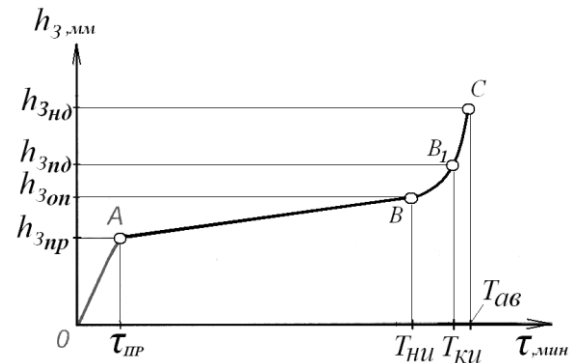


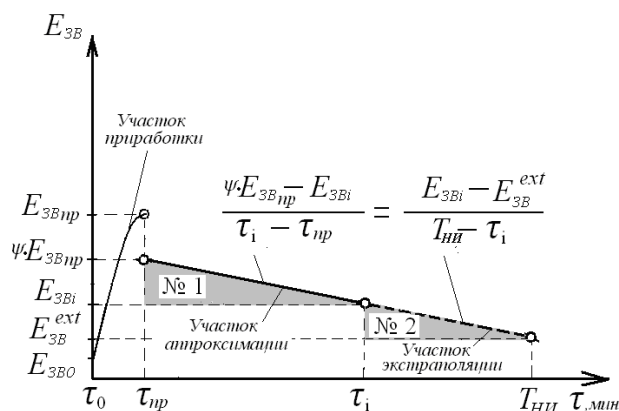
Рис. 1. Классическая кривая износа режущего инструмента при обработке конструкционных сталей

Для решения данной задачи была разработана соответствующая прогнозная модель, отличительная особенность которой заключается в том, что искомый ресурс инструмента является одним из её компонентов. При выполнении этих условий модель позволяет в режиме реального времени, не прерывая процесс резания, прогнозировать момент своевременной замены инструмента.

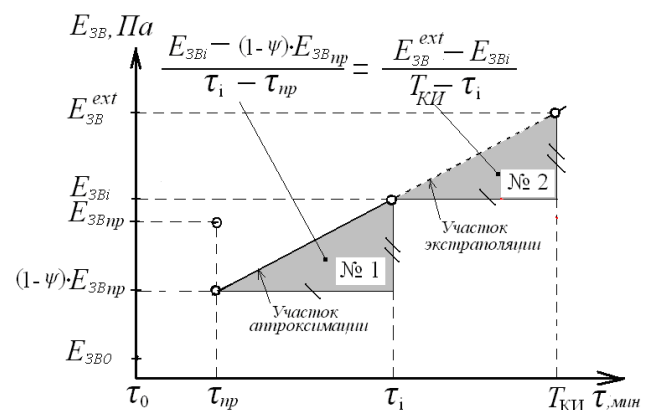
### 4. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ

Прогнозная модель состоит из двух компонент. Первая компонента описывает участок стабильного поведения тренда (рис. 2 а), а вторая – участок его возрастания (рис. 2 б).

Переходный участок отдельно не моделировался, т. к. он получается автоматически при сложении



а)



б)

Рис. 2. Тренд амплитуды давления звука, сопровождающего процесс резания: а) участок нормального износа; б) участок катастрофического износа

графиков, описывающих изменение во времени каждой из компонент.

Преобразуем приведенные на рис. 2 пропорции в уравнения (1) – для участка нормального и (2) – для участка катастрофического износа. Одновременно введём показатель степени для учета нелинейности тренда, неминуемо проявляющейся в практике звукообразования. С точки зрения математики это увеличивает число степеней свободы (число параметров) прогнозной модели и тем самым повышает точность описания с её помощью экспериментальных данных.

На обоих участках серым цветом выделены геометрически подобные треугольники. Треугольники № 1 соответствуют участку аппроксимации, а № 2 – участку экстраполяции. Следует отметить, что их подобие имеет и физическое обоснование. Так, в соответствии с постулатом физики, сформулированным К. Шенноном: «основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены в будущем» [15]. На данном утверждении основываются методы экстраполяционного прогнозирования [16].

$$E_{3Bi}^{HI} = \psi \left[ E_{3B0}^{\Phi} - \eta \cdot \left( \frac{\tau_i - \tau_0}{T_{HI} - \tau_i} \right)^{\gamma} \right], \quad (1)$$

где  $\eta = E_{3B}^{ext} - E_{3Bi}$ ,  $E_{3B}^{ext}$  – предельное значение звукового давления, при достижении которого инструмент находится в нерабочем состоянии и требует замены;  $E_{3B0}^{\Phi}$  – величина давления звука, зарегистрированная при первом (исходном) диагностировании состояния инструмента (после периода приработки (рис. 1, область точки А), которым ввиду его малости (кратковременности) пренебрегаем).

$$E_{3Bi}^{KI} = (1 - \psi) \left[ E_{3B0}^{\Phi} + \alpha \cdot \left( \frac{\tau_i - \tau_0}{T_{KI} - \tau_i} \right)^{\beta} \right], \quad (2)$$

где  $\alpha = E_{3B}^{ext} - E_{3Bi}$ .

Сложив выражения (1) и (2), получим аналитическое описание искомой двухкомпонентной прогнозной модели, описывающей тренд диагностического признака износа инструмента – давления звука – на участках нормального (линейного) и катастрофического (предкатастрофического) износов вплоть до его замены.

$$E_{3B} = \psi \left( E_{3B0}^{\Phi} - \eta \cdot \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_{HI} - \tau} \right)^{\gamma} \right) + (1 - \psi) \left( E_{3B0}^{\Phi} + \alpha \cdot \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_{KI} - \tau} \right)^{\beta} \right), \quad (3)$$

где  $T_{HI}, T_{KI}$  – ресурс инструмента, реализуемый на участке нормального и катастрофического износа соответственно, мин;  $T_{HI}, T_{KI}, \psi, \alpha, \beta, \gamma, \eta$  – опытные параметры прогнозной модели, определяемые в процессе её идентификации по результатам контроля тренда давления звука.

Математически аппроксимация заключается в минимизации функции невязки (4) фактически зарегистрированных амплитуд давления звука и их расчётных значений, полученных с помощью многократных итеративных расчётов значений функции (3). Расчёты проводятся методом случайного поиска (методом Монте-Карло), при котором 30 тыс. раз осуществляется случайный перебор значений опытных параметров  $T_{HI}, T_{KI}, \psi, \alpha, \beta, \gamma, \eta$  в физически реализуемом диапазоне их изменения. В качестве оптимального (искомого) сочетания этих параметров выбирается сочетание, обеспечивающее минимум функционала

$$U = \sum_i^m \left[ E_{3Bi}^{\Phi} - E_{3Bi}^P \right]^2, \quad (4)$$

где  $m$  – количество измерений уровня звука, проведенных за все время контроля состояния инструмента;  $E_{3Bi}^{\Phi}$  – фактические амплитуды давления звука, зарегистрированные за все время резания, в том числе и в текущий момент времени;  $E_{3Bi}^P$  – расчётные амплитуды давления звука, определяемые по формуле (5) и описывающие поведение тренда звука в течение всего периода резания, в том числе и в текущий момент резания.

Применение прогнозной модели (3) проиллюстрировано на рис. 3, где показана аппроксимация графиком прогнозной модели тренда давления звука, зафиксированного при продольном тчении на режимах, приведенных в табл. 1. Там же изображены графики первого и второго компонентов модели, описывающих нормальный и катастрофический (предкатастрофический) износы.

Из рис. 3 и зависимости (3) следует, что режущий инструмент испытывает воздействие комбинированных нагрузок, одна из которых является причиной нормального износа, а вторая – причиной катастрофического износа.

Совместное воздействие этих нагрузок в соответствии с теорией линейного накопления повреждений [17] характеризуется суммарной повреждаемостью, определяемой из следующего выражения:

$$\frac{[h]_{PP}}{T_{PP}} = \frac{[h]_{PP}}{T_{HI}} + \frac{[h]_{PP}}{T_{KI}}, \quad (5)$$

где  $[h]_{PP}$  – предельно допустимый износ инструмента (рис. 1, точка В1), в качестве которого можно рассматривать, например, оптимальный износ, соответствующий точке В на рис. 1;  $T_{PP}$  – ресурс инструмента, ограничиваемый комбинированным воздействием нагрузок;  $[h]_{PP}/T_{PP}$  – результирующая скорость износа (повреждаемость) инструмента при комбинированном воздействии нагрузок;  $[h]_{PP}/T_{HI}$  – повреждаемость инструмента на участке нормального износа;  $[h]_{PP}/T_{KI}$  – повреждаемость инструмента на участке катастрофического (предкатастрофического) износа.

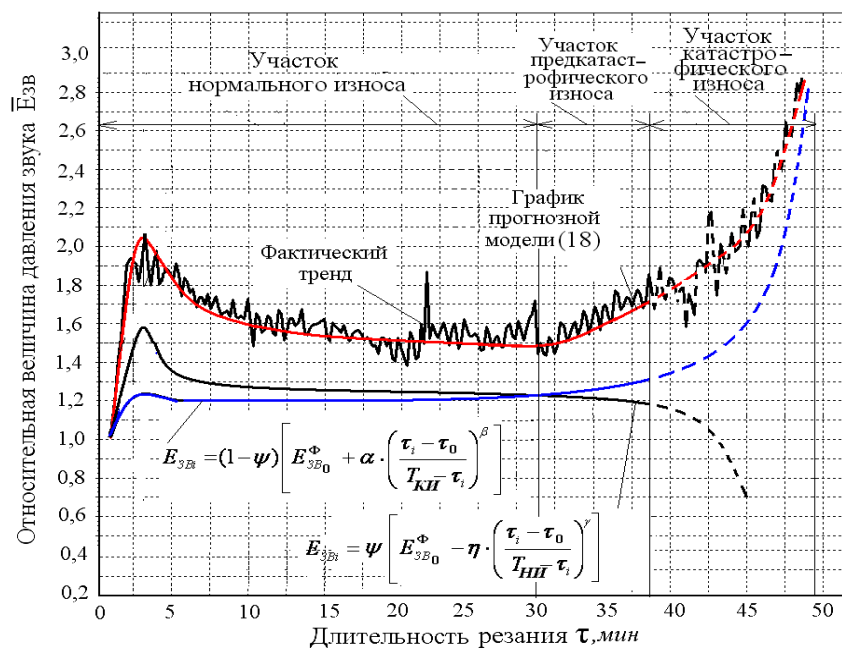


Рис. 3. Иллюстрация прогнозирования наработки инструмента до его замены

Окончательно выражение для прогноза ресурса режущего инструмента  $T_{\text{ПР}}$ , мин, запишется в следующем виде:

$$T_{\text{ПР}} = \frac{T_{\text{НИ}} \cdot T_{\text{КИ}}}{T_{\text{НИ}} + T_{\text{КИ}}} \quad (6)$$

На рис. 4 показан пример аппроксимации тренда звука графиком функции (3) (рис. 4 а). Там же выделены участки тренда, соответствующие характерным участкам кривой износа инструмента (рис. 1).

Результаты прогноза ресурса  $T_{\text{ПР}}$  приведены на рис. 4 б). Из рисунка следует, что прогноз существенно изменяется (колеблется) на участке приработки инструмента, а далее, примерно с середины жизненного цикла инструмента, его вариация существенно уменьшается. Для уменьшения колебаний прогноза  $T_{\text{ПР}}$ , рассчитываемого по формуле (6), применяется экспоненциальное сглаживание его величины [16]:

$$\hat{T}_{\text{ПР}i} = k \cdot T_{\text{ПР}i} + (1 - k) \cdot \hat{T}_{\text{ПР}i-1}, \quad (7)$$

где  $\hat{T}_{\text{ПР}i}, \hat{T}_{\text{ПР}i-1}$  – соответственно, текущее и предыдущее сглаженное значение прогноза ресурса;  $T_{\text{ПР}i}$  – текущее рассчитанное по формуле (6) значение прогноза;  $k$  – коэффициент сглаживания ( $k = 0,2$ ).

На рис. 4 б) указаны так же доверительные границы  $T_{\text{НГ}} - T_{\text{ВГ}}$ , в пределах которых с доверительной вероятностью 0,95 колеблется прогноз  $T_{\text{ПР}i}$ . Как видим, отклонения прогноза от среднего, экспоненциально сглаженного значения примерно с середи-

ны жизненного цикла инструмента не превышают 5 %.

Прогнозная величина ресурса  $\hat{T}_{\text{ПР}}$  характеризует наработку инструмента до выхода его из строя. Процесс же обработки детали должен быть прекращён до наступления этого срока, в противном случае это приведёт к браку детали. Определение момента своевременного прекращения процесса резания предлагается осуществлять посредством специально разработанного для этого показателя качества обработки  $a_{\text{КАЧ}}$  [12].

## 5. МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Главным предназначением технологической металлообрабатывающей системы является качественная обработка детали, что, в свою очередь, напрямую зависит от состояния режущего инструмента. Разработанный метод диагностирования основывается на том, что степень критичности состояния инструмента и, соответственно, качество обработки детали и состояние обрабатывающей системы в целом было предложено оценивать посредством безразмерного показателя  $a_{\text{КАЧ}}$ , представляющего в понятиях теории «нечетких множеств» «функцию принадлежности» [18].

«Функция принадлежности» трансформирует исходные значения входных переменных (амплитуды давления звука  $E_{\text{ЗВ}}$ , текущей наработки инструмента  $\tau$  и прогноза его ресурса  $\hat{T}_{\text{ПР}}$ ) в значения лингвистических переменных «термов» – диагнозов текущего состояния обрабатывающей системы.

Показатель  $a_{КАЧ}$  по своей сути является безразмерным параметром подобия, поэтому аналитическое выражение для него было получено методом, применяемым в теории подобия и размерностей [19]. Следуя этому методу, полагали, что величина показателя  $a_{КАЧ}$  описывается следующим набором определяющих параметров, а именно: исходной величиной износа –  $h(\tau_0)$ , текущей величиной износа –  $h(\tau)$ , текущей наработкой инструмента –  $\tau$  и текущим прогнозом ресурса инструмента –  $T_{ПР}(\tau)$ . Эти параметры имеют размерности длины  $L$  ( $[h(\tau_0)] = L, [h(\tau)] = L$ ) и времени  $T$  ( $[\tau] = T, [T_{ПР}(\tau)] = T$ ).

Искомый показатель  $a_{КАЧ}$  представляли как функцию произведения этих определяющих параметров, каждый из которых возведен в свою степень:

$$a_{КАЧ} = f(h(\tau_0), h(\tau), \tau, T_{ПР}) = h^\alpha(\tau_0) \cdot h^\beta(\tau) \cdot \tau^\gamma \cdot T_{ПР}^\lambda. \quad (8)$$

Далее определяли значения показателей степени. Для этого заменяли величины, стоящие в выражении (8), их размерностями

$$1 = L^\alpha L^\beta T^\gamma T^\lambda = L^{\alpha+\beta} T^{\gamma+\lambda}. \quad (9)$$

Поскольку искомый показатель – безразмерная величина, равная согласно положениям теории размерностей единице, то сомножители в правой части равенства (9) должны иметь нулевую степень, т. е.

$$\alpha + \beta = 0, \gamma + \lambda = 0. \quad (10)$$

Данную систему двух уравнений с четырьмя неизвестными дополняли до 4-х уравнений следующими условиями:  $\beta = 1, \gamma = 1$ .

Совместное решение этих четырех уравнений привело к следующему результату:  $\alpha = -1, \beta = 1, \gamma = 1, \lambda = -1$ . В результате этого фор-

мула для показателя  $a_{КАЧ}$  была представлена в таком виде:

$$a_{КАЧ} = \frac{h(\tau)}{h(\tau_0)} \cdot \frac{\tau}{T_{ПР}(\tau)}. \quad (11)$$

В процессе резания величина износа оценивается косвенным образом по значению его диагностического признака. В качестве подобного признака используется амплитуда давления звука, сопровождающего процесс резания. Исходя из постулата о взаимосвязи контролируемого параметра и его диагностического признака [12], т. е. износа инструмента и амплитуды давления  $E_{ЗВ} \sim h$ , равенство (11) переписали в следующем виде:

$$a_{КАЧ} = \frac{E_{ЗВ}(\tau)}{E_{ЗВ}(\tau_0)} \cdot \frac{\tau}{T_{ПР}(\tau)}. \quad (12)$$

Как видим, показатель  $a_{КАЧ}$  состоит из двух множителей, первый из которых  $E_{ЗВ}(\tau)/E_{ЗВ}(\tau_0)$  представляет безразмерную величину амплитуды давления и играет роль своеобразного коэффициента безопасности. Чтобы показать роль этого множителя, выражение (12) преобразовали относительно второго множителя:

$$\frac{\tau}{T_{ПР}(\tau)} = a_{КАЧ} \cdot \frac{E_{ЗВ}(\tau_0)}{E_{ЗВ}(\tau)}. \quad (13)$$

На участке нормального износа (стационарного изменения тренда давления звука) величина дроби  $E_{ЗВ}(\tau_0)/E_{ЗВ}(\tau)$  близка по величине к единице, т. к. величина давления звука изменяется незначительно (рис. 3, 4). При приближении показателя  $a_{КАЧ}$  к единице левая часть равенства (13) также стремится к единице, что свидетельствует об исчерпании ресурса инструмента в условиях нормального износа и требует его замены. При этом «технологические критерии» состояния инструмента не будут нарушены,

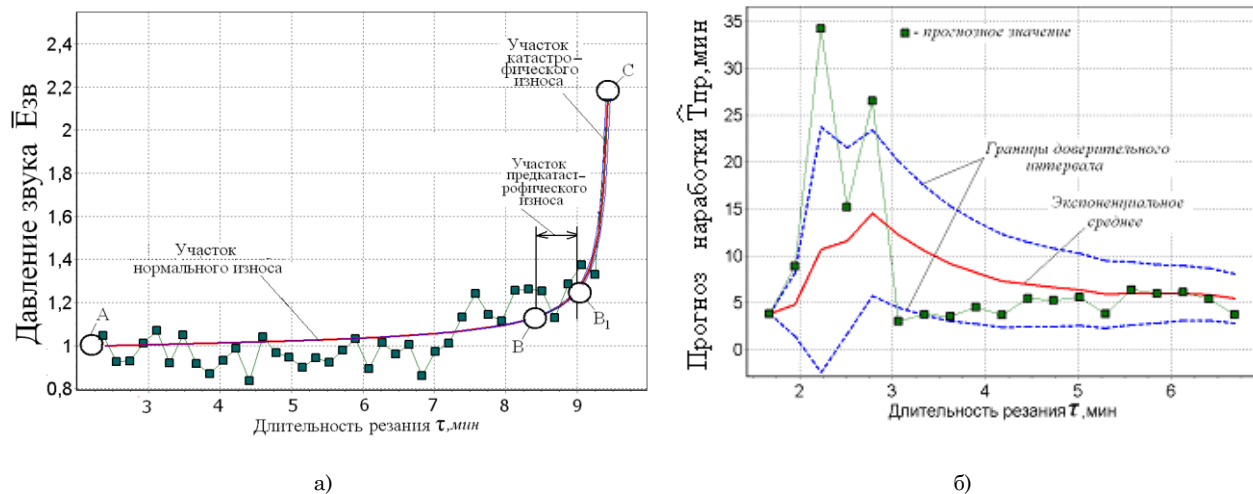


Рис. 4. Аппроксимация графиком прогнозной модели (3) тренда давления звука: а) сопровождающего процесс продольного точения; б) прогноз наработки инструмента до его замены (б) (обрабатываемый материал – сталь 45;  $S = 0,5$  мм/об;  $t = 1,2$  мм;  $n = 560$  об/мин; материал режущей пластинки Т15К6)

т. к. шероховатость и точность формы детали не выйдут за границы технических условий. При переходе же на участок катастрофического износа, из-за увеличения амплитуды давления звука  $E_{ЗВ}(\tau)$ , дробь  $E_{ЗВ}(\tau_0)/E_{ЗВ}(\tau)$  начнет уменьшаться. Это приведет к тому, что по мере приближения показателя  $a_{КАЧ}$  к единице дробь в левой части равенства не превысит единицы. В результате этого процесс резания будет прекращен раньше, чем инструмент исчерпает ресурс в условиях катастрофического износа, т. е. будет выполнено условие  $\tau < T_{КН}$ . Данное обстоятельство позволит заменить инструмент в точке В1 классической кривой износа (рис. 1) и избежать тем самым его аварийной поломки и брака детали.

На рис. 5 приведен пример изменения показателя  $a_{КАЧ}$  в зависимости от длительности резания. Показатель определялся при продольном точении стали 40Х резцом с режущей пластижкой Т15К6 на режимах:  $S = 0,15$  мм/об,  $t = 1,5$  мм,  $n = 560$  об/мин. На рисунке приведены также фотографии пластижки, сделанные в различные моменты ее эксплуатации, наглядно показывающие ухудшение ее состояния с течением времени.

Как видим, изменение показателя  $a_{КАЧ}$  согласуется с изменением состояния режущей пластижки.

Возвращаясь к понятиям теории «нечетких множеств», отметим, что параметр  $a_{КАЧ}$ , являясь «функцией принадлежности», за время резания, возрастая по величине, проходит последовательно ряд значений лингвистической переменной. Лингвистическая переменная, названная «показателем состояния режущего инструмента», имеет ряд «термов». «Термы» представляют собой набор вербальных значений, описывающих постепенно ухудшающийся диагноз состояния инструмента и качества обработки детали (рис. 4 и 5).

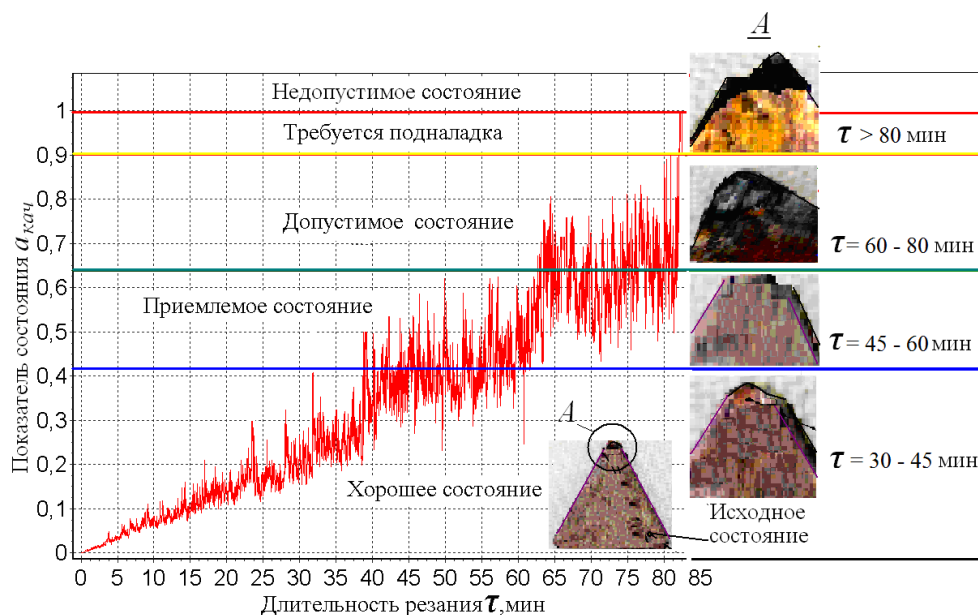
Приведенные в табл. 1 физические значения «термов», т. е. разделяющие их границы, представляют нормализованный ряд предпочтительных чисел  $R5$ , являющийся геометрической прогрессией с корнем  $q = \sqrt[5]{10} \approx 1,56$  [20].

**Таблица 1** – Базовая шкала лингвистической переменной «показатель состояния режущего инструмента»

Вербальные значения «термов»				
Хорошее состояние	Приемлемое состояние	Допустимое состояние	Требуется подналадка	Недопустимое состояние
0–0,41	0,41–0,63	0,63–0,9	0,9–1,0	>1,0

Предпоследний «терм» под названием «Требуется подналадка» соответствует промежуточному участку ВВ1 кривой износа (рис. 1) и тренда давления звука (рис. 4 а). Прекращение обработки детали при попадании значения «функции принадлежности» в этот «терм» обеспечивает выполнение дополнительных условий безопасности и может быть рекомендованным к применению при изготовлении ответственных изделий, а также при адаптивном управлении резанием.

Процедура диагностирования заключается в преобразовании при помощи «функции принадлежности»  $a_{КАЧ}$  исходных значений входных переменных (амплитуды давления звука  $E_{ЗВ}$ , текущей наработки инструмента  $\tau$  и прогноза его ресурса  $\hat{T}_{ПР}$ ) (формула 7) в значения лингвистических переменных. И в зависимости от значения лингвистической переменной текущее состояние инструмента, а следовательно, и качество обработки детали, и состояние обрабатываемой системы в целом относятся к тому или иному «терму», т. е. ставится тот или иной диагноз их технического состояния.



**Рис. 5.** Изменения показателя  $a_{КАЧ}$  и состояния режущей пластижки, зафиксированные при продольном точении

Для внедрения в практику резания данного метода диагностирования необходима его автоматизация. Автоматизация должна осуществляться посредством носимого или встраиваемого микропроцессорного устройства, программное обеспечение которого воспроизводит алгоритм разработанного метода диагностирования. Автоматизация позволит непрерывно диагностировать состояние лезвийного инструмента в режиме реального времени, упреждая его внезапную поломку и брак детали и решая тем самым главную задачу машиностроительного производства – повышения его качества и производительности.

## ВЫВОДЫ

1. Обеспечение эффективности процесса металлообработки невозможно без информации о непрерывно изменяющемся состоянии режущего инструмента. Для решения данной задачи был разработан метод прогнозирования ресурса инструмента и диагностирования на основе этого степени критичности его состояния.

2. Для прогноза ресурса инструмента впервые предложена прогнозная модель, отличающаяся от известных тем, что искомый ресурс включён в ее математическую структуру и находится путем идентификации модели по результатам оперативного контроля тренда давления звука, сопровождающего процесс резания.

3. На основе найденного ресурса инструмента и измеренных амплитуд звукового давления согласно разработанному методу диагностирования рассчитывается безразмерный показатель состояния, представляющий в понятиях теории «нечетких множеств» «функцию принадлежности». Процедура диагностирования в этом случае заключается в преобразовании при помощи «функции принадлежности» исходных значений входных переменных (амплитуды давления звука, текущей наработки инструмента и прогноза его ресурса) в ряд «термов» лингвистической переменной, именуемой «показатель состояния режущего инструмента». «Термы» являются диагнозами текущего состояния инструмента, определение которых и является конечной целью процесса диагностирования его технического состояния.

4. Непременным условием применения в практике обработки материалов резанием рассмотренного метода прогнозирования ресурса режущего инструмента является автоматизация всех процедур его выполнения, начиная с измерения звукового давления и заканчивая анализом исходной информации с представлением результатов анализа в наглядной форме. Автоматизация должна осуществляться посредством переносного или встраиваемого микропроцессорного устройства, программное обеспечение которого воспроизводит алгоритм разработанного метода прогнозирования ресурса инструмента и диагностирования на этой основе степени критичности его состояния.

## Life prediction of cutting tools

V. O. Zaloga<sup>1)</sup>, V. V. Nahorni<sup>2)</sup>

*1), 2) Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine*

The purpose of this article is to examine the methods of diagnosing the quality of functioning of technological system of lathe. This article presents review of the results of mathematical modeling of the dynamics for the wear of a blade tool. It discusses the behavior of sound trend, which accompanying the cutting process as a source of indirect information about the state of the blade tool.

The development of a method begins from practice. It is known that when tool wear linear growth the trend of sound is sufficiently stable. When the tool wear is catastrophic the sound trend is fairly sharply.

The purpose of diagnosis is just the prediction of the moment of catastrophic tool wear. To solve this problem it is necessary to develop an appropriate prediction model. This model should be a function of time and includes seeking resource of the cutting tool. Under these conditions, the model will solve the basic problems of diagnostics in real time without interrupting the cutting process to monitor the status of the system and the quality of machined surface.

To solve this problem was developed predictive model, a distinctive feature and scientific novelty of which is that the seeking tool life is included in the model as one of its main parameters. This parameter is under of identification of the model parameters on the results of monitoring the sound accompanying the cutting process.

A tool life characterizes the deadline for its operation at which the tool should be replaced. Naturally, the cutting process must be suspended until the exhaustion of the tool life for to maintain the quality of workpiece.

For practical application of this method a "Hardware - software system", which allows to diagnose the quality of the functioning of the metalworking technology system in real time was developed.

**Key words:** control, diagnosis, prognosis, quality, forecast operating time.



## Прогнозування ресурсу різального інструменту

В. О. Залога<sup>1)</sup>, В. В. Нагорний<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

У статті розглядається один із варіантів вирішення ключової проблеми обробки матеріалів різанням – прогнозування ресурсу різального лезового інструменту та розроблення на цій основі нового методу діагностування ступеня критичності його технічного стану, що й зумовило актуальність поданого матеріалу. При цьому під ресурсом розуміють період стійкості інструменту між переточуваннями, тому тривалість експлуатації інструменту, що не потребує переточування, найбільш просто піддається автоматичному контролю.

Метою досліджень, результати яких викладені у цій статті, є створення методу прогнозування ресурсу різального інструменту, що ґрунтується на безперервному контролі в процесі різання величини тиску звуку, що супроводжує обробку різанням.

У процесі досліджень були використані такі методи: системного аналізу, теорії різання, теорії коливань та ідентифікації, виконуваної методом випадкового пошуку.

За результатами проведених досліджень розроблено метод прогнозування ресурсу різального інструменту, що ґрунтується на ідентифікації параметрів прогнозної моделі за результатами безперервного контролю величини тиску звуку, що супроводжує процес різання. Причому модель складена таким чином, що ресурс включений до її математичної структури, що дозволяє виключити використання при прогнозуванні статистично ненадійні критеріальні параметри, що описують граничний стан інструменту.

**Ключові слова:** контроль, діагностування, якість виготовлення, прогноз напрацювання, показник стану.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Козочкин М. П. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов / М. П. Козочкин, Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабиров // Измерительная техника. – 2006. – № 7. – С. 30–34.
2. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий: ГОСТ 25751-83. – [Дата введения 1989-10-01]. М.: ГОССТАНДАРТ. – 26 с.
3. Основы теории резания материалов: учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]; под общ. ред.: Мазура Н. П., Грабченко А. И. – [2-е изд.]. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – 534 с.
4. Kuei-Shu Hsua. Optimization of tool wear ratio for automation computer numerical controlled system / Kuei-Shu Hsua // Journal of Information and Optimization Sciences. – 2011. – Vol. 32, Issue 4. – P. 987–996.
5. Pinner Tobias. Monitoring Lathe Tool's Wear Condition by Acoustic Emission Technology. Lecture Notes in Mechanical Engineering. «Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations» / Pinner Tobias. – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P. 183–193.
6. Smith G. C. A method for detecting tool wear on a CNC lathe using a doppler radar detector / G. C. Smith // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – February 2005. – Vol. 25, Issue 3–4. – P. 270–280.
7. Tool flank wear condition monitoring during turning process by SVD analysis on emitted sound signal / [Raja S., Sayeed A., Samraj et al.] // European Journal of scientific research. – 2011. – Vol. 49, Issue 4. – P. 503–509.
8. Пат. 2260786 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 3/58. Способ прогнозирования износостойкости твердосплавных режущих инструментов / Нестеренко В. П. (RU); заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – № 2004124849/28; заявл. 13.08.2004, опубл. 20.09.2005, Бюл. № 28/2005. – 3 с.
9. Пат. 2417140 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 3/58. Устройство контроля износа и прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы чпу станка / Мартинов Г. М., Синопальников В. А., Григорьев А. С. (RU); заявитель и патентообладатель Государственное Образовательное Учреждение Высшего Профессионального Образования Московский Государственный Технологический Университет "Станкин" (RU). – № 2417140/25-08; заявл. 11.11.2009, опубл. 27.04.2011, Бюл. № 06/2008. – 3 с.
10. Пат. 1682888 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 3/58. Способ прогнозирования стойкости режущего инструмента / Новиков Н. В., Девин Л. Н., Пискунов А. К., Дрожжин В. Ф., Доброскок В. Л. (UA); заявитель и патентообладатель: Институт сверхтвёрдых материалов (UA). – № 46874070/28; заявл. 3.05.89, опубл. 7.10.91, Бюл. № 37. – 3 с.
11. Остафьев В. А. Диагностика процесса металлообработки / Остафьев В. А., Антонюк В. С., Тымчик Г. С. – К.: Техніка, 1991, – 152 с.
12. Залога В. А. Индикаторы состояния режущего инструмента и качества металлообработки / В. А. Залога, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3 (33). – С. 46–50.
13. Внуков Ю. Н. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник / Ю. Н. Внуков, В. О. Залога. – Суми: СумДУ, 2010. – 243 с.
14. Зинченко Р. Н. Повышение эффективности точения за счет диагностики износа инструмента по акустическому излучению: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2005. – 188 с.
15. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: Изд-во ин. лит., 1963. – 830 с.
16. Рабочая книга по прогнозированию / [отв. ред. Э. А. Араб-Оглы, И. В. Бестужев-Лада, А. Н. Григорьев и др.]. – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
17. Miner M. A. Experimental verification of cumulative fatigue damage / M. A. Miner // Automot. Aviat. Industr. – 1945. – 93. – P. 20–24.
18. Берман А. Ф. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры / А. Ф. Берман, О. А. Николайчук, А. Ю. Юрин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 3 (75). – С. 48–57.
19. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов [8-е изд.]. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
20. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов [6-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

## REFERENCES

1. Kozochkin M. P., Cochin N. A., Sabirov F. S. (2006). *Izmeritel'naya tekhnika*. Vol. 7. P. 30–34. [in Russian].
2. Granovskiy G. I., Granovskiy V. G. (1985). *Rezanie metallov: Uchebnik dlya mashinostr. i priborostr. spets. vuzov*. M. Vyssh. shk. 304 p. [in Russian].
3. Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. (2013). *Osnovyi teorii rezaniya materialov: uchebnik*. H. NTU "HPI". 534 p. [in Russian].
4. Kuei-Shu Hsua. (2011). *Journal of Information and Optimization Sciences*. Vol. 32, Issue 4. P. 987-996.
5. Pinner Tobias. «Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations» (2014). Springer – Verlag Berlin Heidelberg. P. 183-193.
6. Smith G. C. (2005). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25, Issue 3-4. P. 270-280.
7. Raja S., Sayeed A., Samraj. (2011). *European Journal of scientific research*. Vol. 49, Issue 4. P. 503-509.
8. Pat. 2260786 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 G 01 N 3/58. (2004). № 2004124849/28. Byul. № 28/2005. – 3 p. [in Russian].
9. Pat. 2417140 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 G 01 N 3/58. (2009). № 2417140/25-08. Byul. № 06/2008. – 3 p. [in Russian].
10. Pat. 1682888 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 G 01 N 3/58. (1991). № 46874070/28 Byul. № 37. – 3 p. [in Russian].
11. Ostafev V. A., Antonyuk V. S., Tyimchik G. S. (1991). *Diagnostika protsessa metalloobrabotki*. K.: TehnIka. 152 p. [in Russian].
12. Zaloga V. A. (2013). *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. № 3 (33). P. 46-50. [in Russian].
13. Vnukov Yu. N., Zaloga V.O. (2010). *Znoshuvannya i stiykist rizalnih lezovih instrumentiv*. Sumy. SumDU. 243 p. [in Russian].
14. Zinchenko R. N. (2005). *Povyshenie jeffektivnosti tocheniya za schet diagnostiki iznosa instrumenta po akusticheskomu izlucheniju: Diss. kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Harkov*.
15. Shennon K. (1963). *Raboty po teorii informatsii i kibernetike*. M. izd-vo in. lit. 830 p. [in Russian].
16. Arab-Oglyi E. A., Bestuzhev-Lada I.V., Grigorev A. N. (1982). *Rabochaya kniga po prognozirovaniyu*. M. Myisl, 430 p. [in Russian].
17. Miner M. A. (1945). *Automot. Aviat. Industr.* Vol. 93. P. 20–24.
18. Berman A. F., Nikolaychuk O. A., Yurin A. Yu. (2009). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. № 3 (75). P. 48-57. [in Russian].
19. Sedov L. I. (1977). *Metodyi podobiya i razmernosti v mehanike*. M. Nauka. 440 p. [in Russian].
20. Yakushev A. I., Vorontsov L. N., Fedotov N. M. (1986). *Vzaimozamenaemost, standartizatsiya i tehnicheckie izmereniya*. M. Mashinostroenie. 352 p. [in Russian].