

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Zaloga V., Nagornyj V.  
«Sumy State University», Sumy, Ukraine

### ASSESSMENT TOOL WEAR USING THE METHOD OF THE VIBRODIAGNOSTICS

*Большинство разнообразных по материалу и форме деталей машин требуемую форму и размеры получают в результате механической обработки.*

*Однако недостаточная стойкость инструмента приводит к потере качества детали и вызывает увеличение простоя оборудования, связанного с заменой инструментов, сопровождающееся уменьшением производительности и, как следствие, к уменьшению эффективности производства.*

*Решить данную проблему можно с помощью диагностики, которая позволяет по косвенному диагностическому признаку, например, уровню звука, генерируемого процессом резания, прогнозировать момент замены режущего инструмента. Показателем износа инструмента является его стойкость, т.е. время достижения инструментом допустимой величины его износа. Стойкость в значительной степени определяет основные исходные показатели механической обработки: производительность, экономичность и качество поверхности детали.*

*Ключевые слова: вибродиагностика, стойкость инструмента, прогноз, звук.*

Большинство разнообразных по материалу и форме деталей машин требуемую форму и размеры получает в результате обработки резанием, особенно в случаях, когда необходимо получить детали с высокой точностью и малой шероховатостью получаемой при этом поверхности.

Режущий инструмент является составной частью механической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь». При этом инструмент (при неизменных остальных составляющих) оказывает решающее действие на эффективность этой системы. Степень этого воздействия в свою очередь во многом зависит от надежности инструмента [1]. Вместе с тем, состояние инструмента в процессе обработки постоянно меняется, поскольку рабочие поверхности его лезвия находятся в контакте с перемещаемыми относительно них стружкой и поверхностями на обрабатываемой детали (заготовке), что сопровождается их износом и разрушением.

Показателем износа инструмента является его стойкость, т.е. время достижения инструментом допустимой величины его износа. Стойкость в значительной степени определяет основные выходные показатели механической обработки: производительность, экономичность и качество поверхности детали. Недостаточная стойкость инструмента вызывает увеличение простоя оборудования, связанного с заменой инструментов, сопровождающееся уменьшением производительности. Известно, что на долю режущих инструментов приходится более 40 % общего количества отказов работы обрабатывающей системы [2, 3].

С особенной остротой проблема контроля состояния режущего инструмента проявляется при внедрении автоматических «безлюдных» технологий, требующих использования систем автоматической диагностики и управления процессом резания, обеспечивающих требуемое качество, высокую производительность и минимальные затраты на обработку деталей машин на металлорежущих станках.

Данная задача в условиях, особенно автоматизированного производства, была и продолжает оставаться приоритетной научно-технической проблемой. Решение данной задачи невозможно без эффективного контроля состояния инструментов (их текущей работоспособности) с целью быстрого принятия правильного решения о продолжении процесса обработки или замене инструмента.

Все методы контроля текущего состояния (работоспособности) режущих инструментов можно условно разделить на методы прямого контроля, основанные на непосредственной регистрации износа инструмента, и косвенного контроля, использующие физические явления, которые сопровождают процессы резания и изнашивания инструмента. К подобным физическим явлениям относится, например, звук, генерируемый в процессе резания. Одним из источников звука при определенных условиях может являться, например, изнашивающийся режущий инструмент, обрабатываемая деталь и др.

Интенсивность изнашивания инструмента зависит от ряда факторов: физико-механических свойств обрабатываемого материала и материала инструмента; состояния поверхностей и режущих кромок

инструмента; рода и физико-химических свойств смазывающе-охлаждающей технологической среды; режимов резания; геометрии режущей части инструмента; состояния станка; жесткости технологической системы и других условий обработки.

Определение оптимального времени работы инструмента производится на основании исследования зависимости износа инструмента от времени его работы (рис. 1) [7]. На графике зависимости износа от времени работы, называемой кривой В.Ф. Лоренца [4], можно выделить три основные зоны: 1 — период приработки (участок  $OA$ ); 2 — период нормального изнашивания (участок  $AB$ ); 3 — период повышенного (катастрофического) изнашивания (участок  $BC$ ).

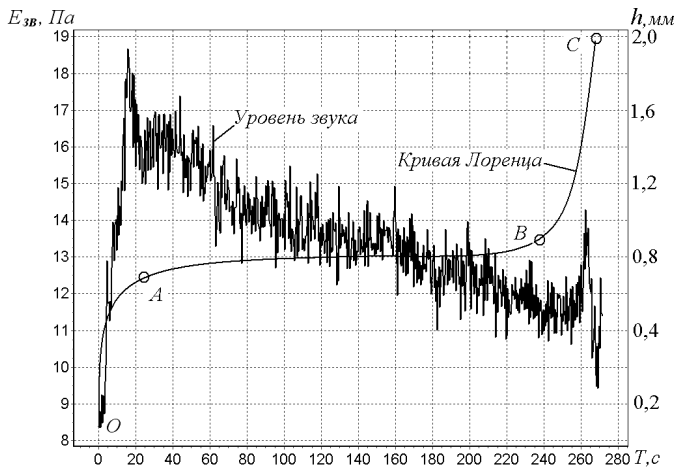


Рис. 1. Изменение звука по мере износа инструмента и кривая В.Ф. Лоренца

Период приработки характеризуется сильным истиранием наиболее выступающих участков (неровностей) поверхности: чем они будут меньше, тем менее резко будет возрастать износ поверхности трения заодно и то же время. Этот участок характеризуется, как правило, интенсивным увеличением ширины площадки износа инструмента и возрастанием уровня звука за счет резкого увеличения силы и мощности трения. Период нормального изнашивания 2 (период нормальной работы инструмента) характеризуется тем, что износ инструмента постепенно и относительно медленно возрастает с увеличением времени его работы. Вместе с тем, несмотря на увеличение площадки износа, уровень шума при этом несколько снижается, что связано с усилением ее демпфирующего воздействия. При достижении некоторой величины постоянно

увеличивающейся площадки износа сила и мощность трения возрастают, в результате чего повышается температура резания, и наступает третий период — период повышенного изнашивания. Этот период, как правило, сопровождается возрастанием шероховатости обработанной поверхности, снижением точности обработки, существенным усилением вибрационных процессов и другими негативными явлениями. При достижении определенной величины (точка  $B$ ) износ начинает резко возрастать, а, соответственно, возрастает и уровень звука. Участок  $BC$  кривой соответствует периоду предельного износа. В этот период износ нарастает столь быстро, что если не прекратить процесс резания, он достигнет недопустимых значений и это скажется на точности обработки за счет изнашивания лезвия инструмента в радиальном направлении, качестве поверхностного слоя за счет интенсификации силового, теплового и вибрационного действия и может даже исключить возможность восстановления режущей способности инструмента. Таким образом, точка  $B$  на кривой изнашивания характеризует момент прекращения резания с целью смены инструмента.

Целью исследований, результаты которых излагаются в данной статье, являлась разработка методики определения момента (точка  $B$ ) своевременной замены инструмента, выполняемой по результатам диагностики его состояния.

Рассмотрим более подробно обоснование предлагаемой методики на примере точения, однако, как показала её дальнейшая апробация при определении стойкости инструментов отличных от токарного резца, она применима и для оценки стойкости иных по типу инструментов. Это объясняется тем, что природа износа разнообразных инструментов мало отличается, а, в большинстве случаев, она одна и та же.

По мере изнашивания токарного резца происходит изменение силы резания  $P$ , часто отождествляемой с её тангенциальной составляющей  $P_z$ , соответственно изменяется амплитуда колебаний инструмента и изменяется уровень звука, генерируемого в системе резания.

При обработке жесткой детали амплитуда возникающих колебаний инструмента определяется величиной прогиба консольно-закрепленного резца под воздействием, главным образом, тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  (рис. 2).

Величину  $P_z$  можно определить из следующего выражения:

$$P_z = \sigma_p \cdot f, \quad (1)$$

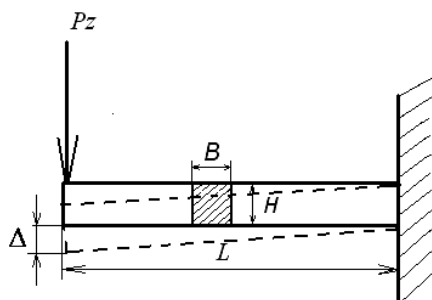


Рис. 2. Схема нагружения инструмента при точении

где  $f$  - площадь поперечного сечения срезаемого слоя (площадь среза),  $m^2$ ;  $\sigma_p$  - разрушающее напряжение, при котором происходит отделение стружки, МПа.

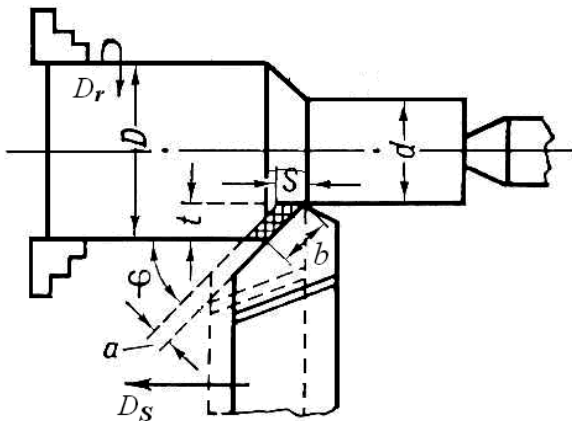


Рис. 3. Площадь поперечного сечения срезаемого слоя

Известно, что площадь среза  $f$  является функцией как параметров среза ( $a, b$ ), так и параметров режима резания - подачи  $S$  и глубины резания  $t$  (рис.3):

$$f = a \cdot b = S \cdot t, \quad (2)$$

где  $a = S \cdot \sin \varphi$  и  $b = t / \sin \varphi$ , соответственно, толщина и ширина среза, мм;  $\varphi$  - главный угол в плане,  $^\circ$ .

Формула (1) с учетом (2) переписывается в следующем виде:

$$P_z = \sigma_p \cdot S \cdot t. \quad (3)$$

Из (3) следует, что составляющая силы резания  $P_z$  возрастает с увеличением площади среза. Известно, что подача влияет на силу резания в меньшей степени, чем глубина резания. В общем случае с увеличением глубины резания  $t$ , сила  $P_z$  возрастает по закону, близкому к пропорциональному

Прогиб инструмента  $\Delta$  (рис. 2) определится из

следующего выражения:

$$\Delta = \frac{P_z}{K} = \frac{\sigma_p \cdot S \cdot t \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} = 4 \cdot \frac{\sigma_p \cdot S \cdot t \cdot L^3}{E \cdot B \cdot H^3}, \quad (4)$$

где  $K$  - изгибная жёсткость державки резца;  $E$  - модуль упругости материала державки резца;  $B, H$  и  $L$ , - соответственно ширина, высота и вылет державки резца, мм.

Размерный износ лезвия инструмента (износ в радиальном направлении) приводит к уменьшению параметра  $b$  (ширины срезаемого слоя) и, соответственно, к изменению жёстко связанной с ним глубины резания  $t$ . Таким образом, для этих условий можно принять, что все параметры в формуле (4) в процессе резания, за исключением параметра  $t$ , остаются неизменными. Учитывая это, (4) можно представить в виде:

$$\Delta = \gamma \cdot t, \quad (5)$$

где  $\gamma = 4 \cdot \frac{\sigma_p \cdot S \cdot L^3}{E \cdot B \cdot H^3}$ .

На рис. 4 показан характер изменения уровня звука в непосредственной зависимости от величины износа инструмента [5].

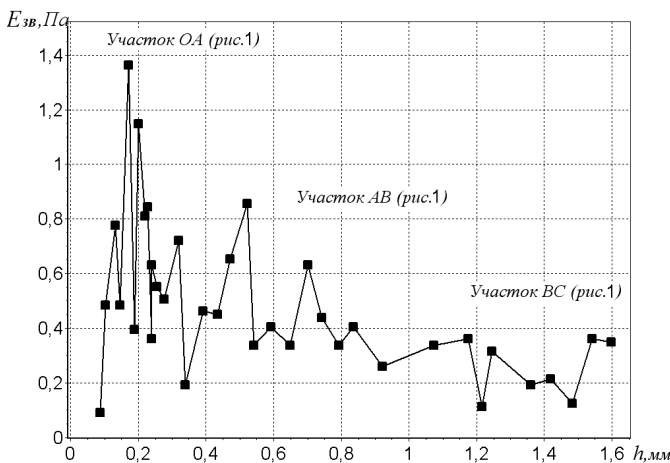


Рис. 4. Зависимость уровня звука от величины износа инструмента

Из приведенных данных следует, что в период приработки уровень звука растет (участок  $OA$ , рис. 1), а затем на участке  $AB$  падает и на участке  $BC$  снова начинает расти.

Износ инструмента на участке приработки в значительной степени связан с высотой и формой микронеровностей на рабочих поверхностях лезвия инструмента, образовавшихся при его заточке (рис. 5). В начальный момент работы трущихся поверхностей ( $\tau = 0 \dots T_{III}$ ) их контакт происходит по вершинам микронеровностей, при этом фактическая поверхность контакта очень мала и в точках контакта по вершинам выступов возникают напряжения, превышающие пределы текучести  $\sigma_T$  и разрушения  $\sigma_B$  инструментального материала. В результате этот период характеризуется упругим сжатием и пластическим смятием выступов, а при

относительном перемещении — сдвигом, срезом и скалыванием выступов (вершин) неровностей. Это приводит к интенсивному начальному износу инструмента и к такой же интенсивной приработке трущихся поверхностей

(передней и задних поверхностей инструмента в зонах их контакта, соответственно, со стружкой и с поверхностями обрабатываемой детали, рис. 5 [1]).

На участке приработки изменение глубины резания математически можно описать так (рис. 6):

$$t = t_0 + v_{ПП} \cdot \tau, \quad (6)$$

где  $t_0$  - исходная (фактическая) глубина резания, определяющая величину фактической площади срезаемого слоя, через которую вначале приработки инструмента на него, согласно формуле (3), передаётся усилие резания;  $v_{ПП}$  - скорость износа, характерная для данного сочетания материалов пар трения «деталь-инструмент»;  $\tau$  - текущее время механической обработки, сек.

При окончании периода приработки (точка  $A$  на рис. 1) длительность резания равна времени приработки ( $\tau = T_{ПП}$ ), а скорость последующего износа в радиальном направлении на участке нормальной работы инструмента (участок  $AB$ , рис.1) можно определить следующим образом:

$$v_{ПП} = \frac{t_{НОМ} - t_0}{T_{ПП}}, \quad (7)$$

где  $t_{НОМ}$  - номинальная глубина резания, устанавливаемая после окончания приработки, выбираемая по справочным данным и отвечающая требованиям технологии резания металлов.

На участках  $AB$  и  $BC$  изменение глубины резания  $t$  вследствие износа инструмента из-за уменьшения ширины срезаемого слоя  $b$  (рис. 3) описывается так:

$$t = t_{НОМ} - v_{ПП} \cdot (\tau - T_{ПП}). \quad (8)$$

С учётом (7) выражение (8) переписывается следующим образом:

$$t = t_{НОМ} - \frac{t_{НОМ} - t_0}{T_{ПП}} \cdot (\tau - T_{ПП}). \quad (9)$$

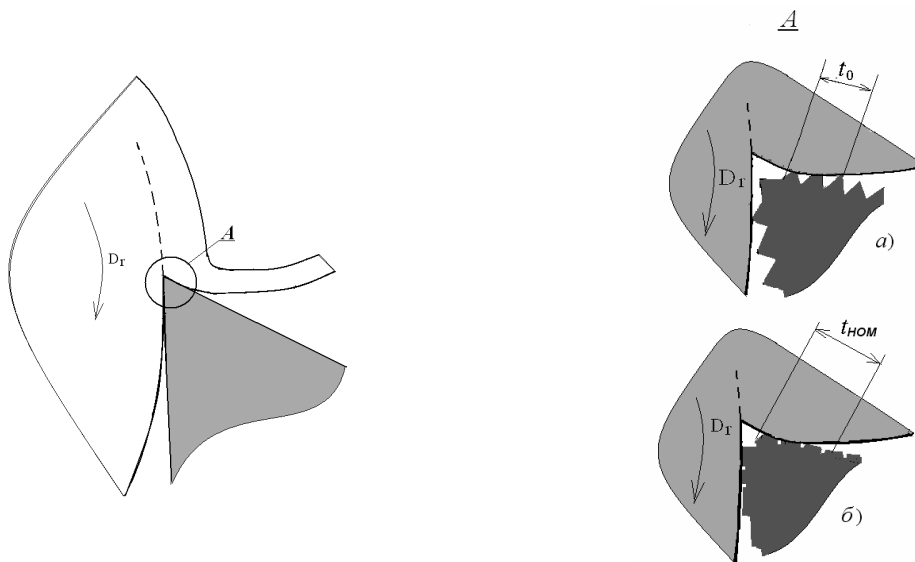


Рис. 5. Схема взаимодействия инструмента с микронеровностями с обрабатываемой деталью:  
а – резец до приработки; б – резец после приработки

Изменение уровня звука на участке приработки описывается уравнением:

$$E_{ЗВ} = E_{ЗВ_0} + \vartheta_{ПП} \cdot \tau, \quad (10)$$

где  $E_{ЗВ_0}$  - уровень звука в Па, регистрируемый в начале периода нормальной работы инструмента (точка  $O$  на рис. 1),  $\vartheta_{ПП}$  - скорость изменения уровня звука на участке приработки инструмента (участок  $OA$ , рис. 1);  $\tau$  - время резания.

$$\vartheta_{ПП} = \frac{E_{ЗВ}^{MAX} - E_{ЗВ_0}}{T_{ПП}}, \quad (11)$$

где  $E_{ЗВ}^{MAX}$  - максимальный уровень звука, достигаемый в конце участка приработки инструмента (точка  $A$  на рис. 1).

Формула (11) носит оценочный характер и даёт усреднённое значение скорости изменения уровня звука на участке приработки. На самом же деле изменение скорости носит более сложный характер (рис. 1), поэтому изменение величины скорости предлагается описывать следующей зависимостью, уточняющей выражение (11):

$$\vartheta = \vartheta_{PP} \cdot \frac{\tau}{\sqrt{\vartheta_{PP}^2 \cdot (T_{PP}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}} \quad (12)$$

С учётом (12) соотношение (10) запишется в следующем виде:

$$E_{3B} = E_{3B_0} + \vartheta_{PP} \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt{\vartheta_{PP}^2 \cdot (T_{PP}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}} \quad (13)$$

На участках стационарного и катастрофического износа (участки *AB* и *BC*) изменение уровня звука описывается ранее рассмотренной моделью [7], где в качестве параметра  $E_{3B}^{MAX}$  рассматривается уровень звука, регистрируемый в конце участка приработки в точке *A* (рис.1):

$$E_{3B} = E_{3B}^{MAX} + \alpha \cdot E_{3B}^{MAX} \cdot \left( \frac{\tau - T_{PP}}{T_{PEP} - \tau} \right)^\beta \quad (14)$$

Таким образом, изменение диагностического признака износа инструмента - уровня звука - от начала эксплуатации инструмента до его замены ( $T_{ЗАМ}$ ) согласно формулами (13) и (14) описывается следующим комплексным выражением, состоящим из двух слагаемых.

$$E_{3B} = E_{3B_0} + \vartheta_{PP} \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt{\vartheta_{PP}^2 \cdot (T_{PP}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}} + E_{3B}^{MAX} \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{\tau - T_{PP}}{T_{ЗАМ} - \tau} \right)^\beta \right], \quad (15)$$

где  $T_{ЗАМ}$  - время замены инструмента, мин.

Параметр  $T_{ЗАМ}$ , входящий в данную зависимость, характеризует прогнозируемую стойкость инструмента. Определение этого параметра при обработке результатов контроля изменения уровня звука, генерируемого процессом резания, и составляет суть рассматриваемой методики.

Параметр  $T_{ЗАМ}$  определяется в процессе минимизации следующего функционала:

$$U = \sum_{i=1}^m \left( E_{3B_i}^{изм} - E_{3B_i}^{расч} \right)^2, \quad (16)$$

где  $E_{3B_i}^{изм}, E_{3B_i}^{расч}$  - соответственно, измеренное и рассчитанное по выражению (15) значение уровня звука;  $m$  - количество измерений.

Апробация зависимости (15) с целью прогноза наработки инструмента до его своевременной замены проводилась на трёх отличающихся друг от друга видов инструментов: токарном резце, цилиндрической фрезе и ноже бумагорезальной машины [6,7]. Результаты апробации приведены на рис. 6-8.

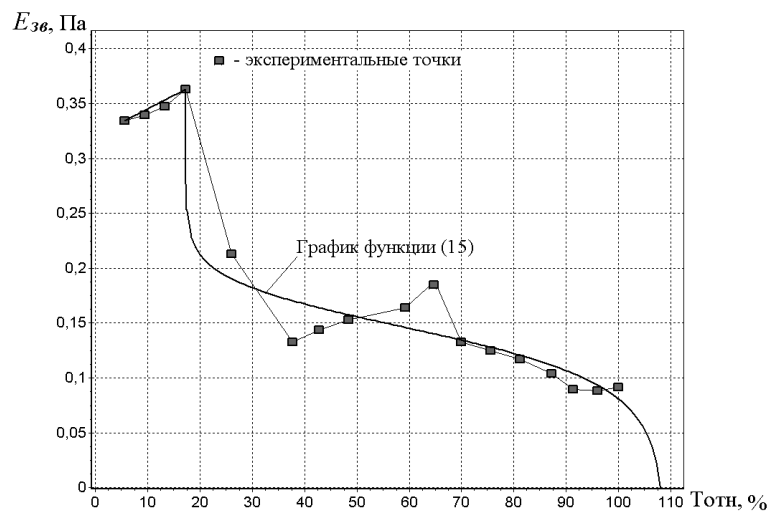


Рис. 6. Аппроксимация графиком функции (15) экспериментальных данных [10] о характере изменения уровня звука в зависимости от наработки токарного резца

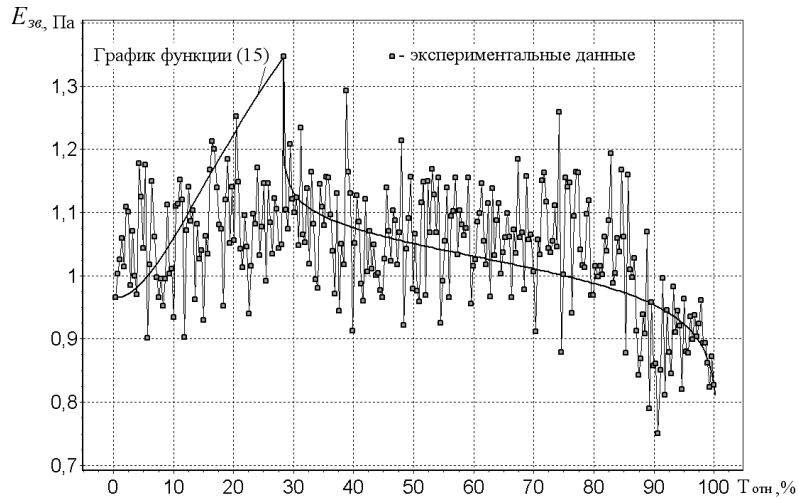


Рис. 7. Аппроксимация графиком функции (15) экспериментальных данных о характере изменения уровня звука в зависимости от наработки фрезы

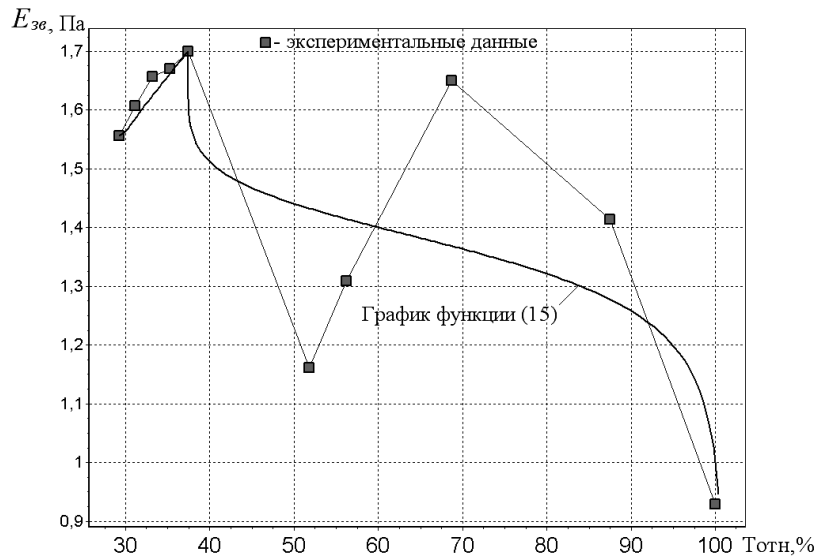


Рис. 8. Аппроксимация графиком функции (15) экспериментальных данных о характере изменения уровня звука в зависимости от наработки бумагорезального ножа

### Выводы

1. Разработана методика, позволяющая по косвенному диагностическому признаку – уровню звука, генерируемого процессом резания, прогнозировать момент замены режущего инструмента.
2. График предложенной зависимости аппроксимирует экспериментальные кривые, как на участке приработки инструмента, так и на участке его постепенного износа.
3. Качество аппроксимации характеризуется тем, что расчетные и экспериментальные графики в конечных точках совпадают. Это является весьма важным, т.к. эта точка на экспериментальном графике соответствует моменту замены инструмента. При этом параметр  $T_{ЗАМ}$  полученной зависимости совпадает по величине с фактической наработкой инструмента до его замены.
4. Данная методика может быть использована в станках с числовым программным управлением, что улучшит основные показатели механической обработки: производительность, экономичность и качество получаемой при этом детали.

### Анотація.

Більшість різноманітних за матеріалом і формою деталей машин необхідну форму і розміри отримують в результаті механічної обробки.

Однак недостатня стійкість інструменту призводить до втрати якості деталі і викликає збільшення простою обладнання, пов'язаного із заміною інструментів, що супроводжується зменшенням продуктивності і, як наслідок, до зменшення ефективності виробництва.

Вирішити дану проблему можна за допомогою діагностики, яка дозволяє за непрямою діагностичною ознакою, наприклад, рівнем звуку, що генерується процесом різання, прогнозувати момент заміни різального інструменту. Показником зносу інструменту є його стійкість, тобто час досягнення інструментом допустимої величини його зносу. Стійкість в значній мірі визначає основні вихідні показники механічної обробки: продуктивність, економічність і якість поверхні деталі.

Ключові слова: вібродіагностика, стійкість інструменту, прогноз, звук.

#### **Abstract.**

*The subject of this study is the cutting tool.*

*The aim is to develop a method to determine the actual resistance of the tool.*

*The research results, are presented in this paper, were carried out computational-experimental method, and showed, that tool wear, leading to its failure, occurs over time in accordance with the well-known Lorenz curve. This curve has three characteristic regions, describing the burnishing tool, its normal operation and catastrophic deterioration or destruction.*

*As a result of this work, was obtained by an analytical dependence, graph which describes all three periods of operation of the instrument. The desired tool life is in this relationship as one of its parameters.*

*The proposed method for estimating the tool life can be used in lathes with numerical control.*

*Conclusion. An efficient method for estimating the tool life, allowing for indirect features - the level of sound, that is generated by the cutting process, to predict the time of replacement of the cutting tool.*

Keywords: Resistance, tools, sound, wear, damage

1. Залогова В.О. Зношення і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник/ Ю.М. Внуков, В.О. Залогова. - Суми: Сумський державний університет, 2010. - 243с.
2. Суркова А.И., Буртовой В.М. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ за счет применения систем автоматизированного контроля/ А.И. Суркова, В.М. Буртовой // Прогрессивные технологии в машиностроении: тематический сборник научных трудов — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. — С. 39-42
3. Козочкин М.П. Виброакустическая диагностика технологических процессов/ М.П.Козочкин . – М.: ИКФ «Каталог», 2005.- 196 с.
4. Лоренц В. Ф. Износ деталей сельскохозяйственных машин/ В. Ф. Лоренц - М., Машгиз, 1948. -98 с.
5. Sundaram S., P. Senthilkumar P., A. Kumaravel A., Manoharan N. Study of flank wear in single point cutting tool using acoustic emission sensor techniques / S. Sundaram и др. // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 3, No. 4, August 2008. – С. 32-36.
6. Залогова В.А. Зинченко Р.Н. Исследование возможности применения метода диагностики по акустическому излучению при чистовом точении титанового сплава./ В.А. Залогова, Р.Н. Зинченко// Веснік СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. №4, С. 118-125.
7. Нагорный В.В. Прогнозирование работоспособности режущего инструмента на основе оценки напряженного состояния поверхностного слоя обрабатываемого материала/ К.А. Дядюра, В.В. Нагорный // Вісник СевНТУ Вип. 111: Машинобудування та транспорт: зб. наук. пр. - Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. - С. 66-71.

#### **REFERENCES**

1. Zaloga V.O., Ju.M. Vnukov Znoshuvannja i stijkist' rizar'nih lezovih instrumentiv: navchal'nij posibnik [Wear resistance and cutting blade tools] Sumi: Sums'kij derzhavnij universitet, 2010, 243 p.
2. Surkova A.I., Burtovoj V.M. Improving the efficiency of processing on CNC machines through the use of automated control systems. Progressivnyye tehnologii v mashinostroenii: tematiceskij sbornik nauchnyh trudov, 2006. pp. 39 - 42.
3. Kozochkin M.P. Vibroakusticheseskaja diagnostika tehnologicheskikh processov [Vibroacoustic diagnostics of technological processes] Moscow: IKF «Katalog», 2005, 196 p.
4. Lorenc V. F. Iznos detalej sel'skhozajstvennyh mashin [Wear of agricultural machines] Moscow: Mashgiz, 1948, 98 p.
5. Sundaram S., P. Senthilkumar P., A. Kumaravel A., Manoharan N. Study of flank wear in single point cutting tool using acoustic emission sensor techniques. ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 3, No. 4, August 2008, pp. 32 - 36.
6. Zaloga V.A. Zinchenko R.N. Investigation of the possibility of applying the method for diagnosis of acoustic emission in finish turning of titanium alloy. Vesnik CumDU. Serija Tehnichni nauki, 2008, No. 4, pp. 118 - 125.
7. K.A. Djadjura, Nagornij V.V. Predicting performance of cutting tools based on an assessment of the surface layerstress of the material. Mashinobuduvannja ta transport: zb. nauk. pr. - Sevastopol', No. 4, 2010, pp. 66 - 71.