

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 621.317.08

*И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик, В. С. Чапаев*

## ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСА РЕЗЦА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Аннотация.* Предлагается новый виброакустический метод измерения износа режущего инструмента с использованием трехтактного интегрирования для станков с числовым программным управлением. Виброакустическое устройство, основанное на этом методе, позволяет повысить точность измерения состояния режущей кромки инструмента за счет подавления помех двух некоррелированных между собой частот. Интегрирование производится за два равных первых такта, длительность которых кратна периоду первой сетевой помехи. Поэтому напряжение с частотой первой помехи  $\omega_{п1}$  в моменты окончания первых двух тактов будет полностью подавлено. При длительности интервала времени сдвига этих двух тактов, равном половине периода напряжения второй помехи частотой  $\omega_{п2}$  (вращения заготовки), к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегрирования происходит разряд конденсатора обратной связи интегратора напряжением опорного источника. Это реализует преобразование «напряжение – время». Заполняя интервал времени третьего такта импульсами образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент  $N_x$  напряжения состояния режущей кромки инструмента. Возможность измерения износа инструмента виброакустическим методом подтверждена экспериментальными исследованиями и математическим моделированием акустических полей острого и изношенного резца.

*Ключевые слова:* измерение износа режущего инструмента виброакустическим методом, математическое моделирование, интегральное уравнение, субиерархический метод.

*I. R. Dobrovinskiy, Yu. T. Medvedik, M. Yu. Medvedik, V. S. Chapayev*

## CUTTER WEAR ESTIMATION BY VIBROACUSTIC METHOD AND SIMULATION OF ACOUSTIC FIELD INTENSITY INSIDE THE CUTTING TOOL

*Abstract.* The researchers suggest a new vibroacoustic method for measuring the wear of cutting tools using three-stroke integration for machine tools with computer numerical control (CNC). Double glazing vibroacoustic device improves the accuracy of the tool's cutting edge by suppressing two uncorrelated to each other noise

frequencies. The integration is performed over two equal first strokes, the time period of which is multiple of the first power line disturbance. Therefore, the voltage with the frequency of the first disturbance  $\omega_p1$  in the moments after the first two strokes will be completely suppressed. Having the length of the interval of shift time of two strokes being half the voltage period of the second disturbance frequency  $\omega_p2$  (workpiece rotation), by the end of the second measure of integration the disturbance voltage frequency will be suppressed as well. During the third stroke there occurs the discharge of the feedback capacitor of the integrator by the voltage from the reference source. It fulfils the “voltage-time” conversion. By filling the interval of a third stroke with pulses of exemplary frequency  $T_0$ , we obtain the digital equivalent of  $N_x$  voltage of the tool’s cutting edge state. The possibility of instrument wear estimation by the vibroacoustic method is proved experimentally and by mathematical modeling of acoustic fields of a sharp or worn cutter.

*Key words:* measurement of cutting tool wear, mathematic modeling, three-stroke integration, subhierarchic method.

### **Введение**

Использование виброакустических методов измерения состояния режущей кромки инструмента в процессе точения возможно только при выделении полезного вибросигнала резания на фоне значительного уровня помех, вызванных вибрациями системы станок-приспособление – инструмент – деталь, изменением в пределах скольжения скорости вращения асинхронного привода станка, некруглостью и неоднородностью материала заготовки [1]. Точность измерения износа режущего инструмента может быть повышена за счет разделения напряжений вибраций станка и инструмента, раздельного их измерения и компенсации напряжений помех. Эти задачи невозможно решить без использования современных средств измерений, таких как интегрирование, синхронизация и др.

Однако для рационального использования современной датчиковой аппаратуры и средств измерений вибросигнала необходимо математическое моделирование картины акустического поля в теле резца в процессе резания. Такое математическое моделирование в первую очередь должно подтвердить существование зависимости между состоянием режущей кромки инструмента и картиной напряженности акустического поля под датчиком вибраций, т.е. ответить, возможно ли в принципе вести виброакустический контроль состояния режущей кромки инструмента на различных режимах резания и при обработке различных материалов.

### **1. Математическое моделирование**

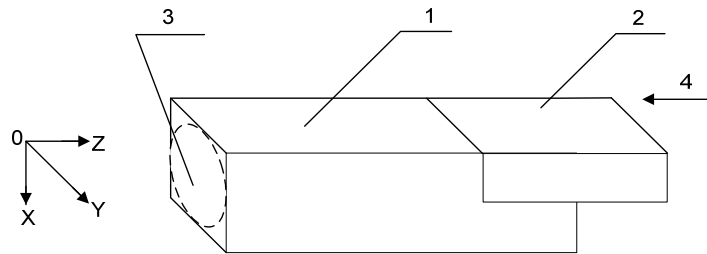
В качестве объекта моделирования был выбран резец, со стальной державкой 1 и твердосплавной режущей кромкой 2, представленный на рис. 1,а, указано место крепления датчика вибросигнала 3, направление виброакустического воздействия на резец в момент резания 4. Для акустического моделирования выбрана акустическая волна длиной, равной размеру резца.

Рассмотрим задачу дифракции акустической волны на теле  $Q$  (резец с твердосплавной режущей кромкой), расположенном в свободном пространстве  $R^3$ .

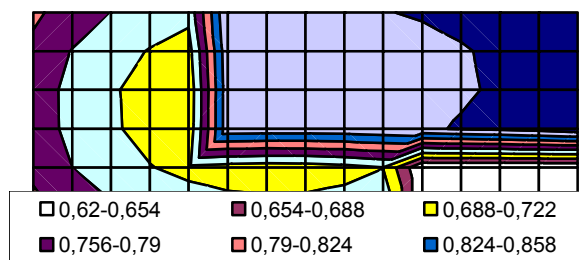
Пусть дано неоднородное уравнение Гельмгольца:

$$\Delta u + k^2(x)u = f(x), \quad (1)$$

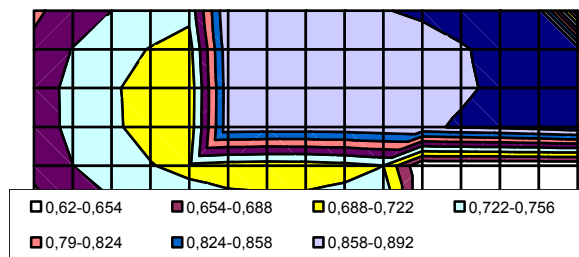
где  $f(x)$  – известная функция с компактным носителем;  $k^2(x)$  – непрерывная функция.



a)



b)



c)

Рис. 1. Резец с твдосплавной режущей кромкой (a); картина напряженности акустического поля в целом твдосплавном резце (X–Z) (b); картина напряженности акустического поля в изношенном твдосплавном резце (X–Z) (c)

Будем предполагать, что на границе раздела двух сред выполняются условия сопряжения

$$[u]_{\partial Q} = 0, \quad \left[ \frac{\partial u}{\partial n} \right]_{\partial Q} = 0 \quad (2)$$

и условия излучения Зоммерфельда

$$\frac{\partial u}{\partial r} = iku + o\left(\frac{1}{r}\right), \quad r := |x| \rightarrow \infty. \quad (3)$$

После ряда преобразований задача в строгой математической постановке сводится к интегральному уравнению Липпмана – Швингера [3–7]:

$$u(x) = f^0(x) + \int_Q G(x,y)(k_0^2 - k^2(y))u(y)dy. \quad (4)$$

Используя метод Галеркина, численно решаем задачу распространения акустического поля внутри неоднородной фигуры простой геометрической формы (резец с твердосплавной режущей кромкой). Используя субиерархический метод [2–6], построим решение поставленной задачи на фигуре, представленной на рис. 1,а. Вопросы сходимости метода, единственности, разрешимости рассмотрены в [3–7].

Для моделирования напряженности акустического поля в различных плоскостях тела резца был разработан пакет программ для анализа напряженности акустического поля в средах различной плотности.

Результаты моделирования представлены на рис. 1,б,в и рис. 2,а,б. Значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для целого резца приведены в табл. 1, а для изношенного резца – в табл. 2.

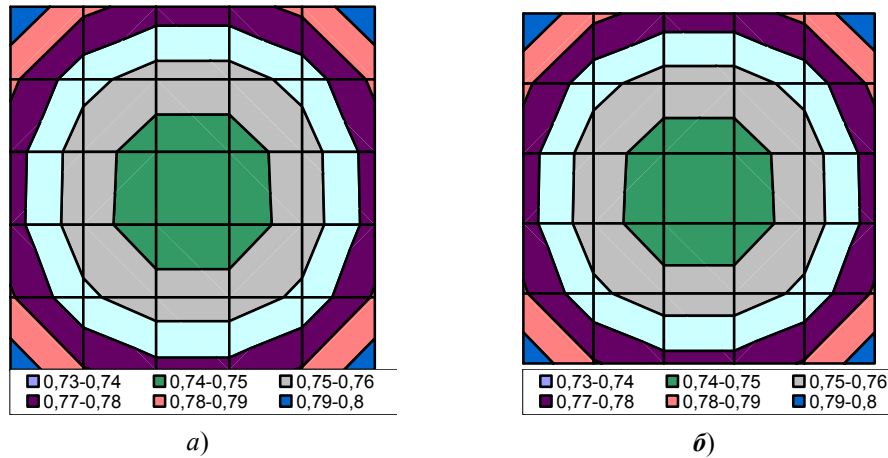


Рис. 2. Картина напряженности акустического поля в теле целого твердосплавного резца под датчиком вибраций (X–Y) (а); картина напряженности акустического поля в теле изношенного твердосплавного резца под датчиком вибраций (X–Y) (б)

Таблица 1

Нормированные значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для целого резца (Z = 0)

X\Y		Координаты разбиения по оси Y					
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
Координаты разбиения по оси X	X <sub>1</sub>	0,79677	0,78117	0,77414	0,77455	0,78235	0,79864
	X <sub>2</sub>	0,7808	0,7622	0,75388	0,7543	0,76343	0,78276
	X <sub>3</sub>	0,77338	0,75347	0,74452	0,74495	0,75474	0,77538
	X <sub>4</sub>	0,77338	0,75347	0,74452	0,74495	0,75474	0,77538
	X <sub>5</sub>	0,7808	0,7622	0,75388	0,7543	0,76343	0,78276
	X <sub>6</sub>	0,79677	0,78117	0,77414	0,77455	0,78235	0,79864

Таблица 2

Нормированные значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для изношенного резца ( $Z = 0$ )

XY		Координаты разбиения по оси Y					
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
Координаты разбиения по оси X	X <sub>1</sub>	0,7969	0,78129	0,77426	0,77466	0,78246	0,79875
	X <sub>2</sub>	0,78092	0,76231	0,754	0,75441	0,76354	0,78287
	X <sub>3</sub>	0,77349	0,75359	0,74463	0,74506	0,75484	0,77549
	X <sub>4</sub>	0,77349	0,75358	0,74462	0,74505	0,75484	0,77548
	X <sub>5</sub>	0,78091	0,7623	0,75399	0,75441	0,76353	0,78286
	X <sub>6</sub>	0,79688	0,78128	0,77425	0,77465	0,78245	0,79874

Результаты моделирования картины напряженности акустического поля в теле резца позволили определиться с расположением датчика вибраций на инструменте, а также создать устройство, использующее виброакустический метод измерения износа режущей кромки инструмента.

## 2. Разработка метода трехтактного последовательного интегрирования для виброакустического устройства измерения износа инструмента

В виброакустическом устройстве измерения состояния режущей кромки инструмента подавление помех двух некоррелированных между собой частот производится за два равных первых такта, длительность которых кратна периоду первой сетевой помехи [8]. Поэтому напряжение с частотой первой помехи  $\omega_{п1}$  в моменты окончания первых двух тактов будет полностью подавлено. При длительности интервала времени сдвига этих двух тактов, равного половине периода напряжения второй помехи частотой  $\omega_{п2}$ , к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегрирования происходит разряд конденсатора обратной связи интегратора напряжением опорного источника. Это реализует преобразование «напряжение – время». Заполняя интервал времени третьего такта импульсами образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент  $N_X$  измеряемого напряжения.

В качестве датчиков числа полуоборотов (ДЧПО) шпинделя станка могут использоваться как оптический, так и магнитоиндукционный датчики. В первом случае при использовании оптического датчика последний содержит светодиод и фотодиод, закрепленные на неподвижной скобе, а между ними находится диск с двумя диаметрально расположенными прорезями, закрепленный в торце шпинделя станка. Поэтому за каждый оборот вращения шпинделя станка в момент нахождения прорезей диска между свето- и фотодиодами появляются два синхроимпульса с выхода оптического датчика.

Во втором случае в качестве датчика числа полуоборотов используется магнитоиндукционный датчик следующей конструкции. Подвижная часть датчика содержит диск, закрепленный в торце шпинделя станка, и два постоянных магнита, расположенных диаметрально на диске и вращающихся вместе с ним. Неподвижной частью магнитоиндукционного датчика является измерительная катушка, закрепленная на неподвижной скобе к станине станка.

В момент прохождения магнитов вблизи неподвижной измерительной катушки в последней наводятся два синхронизирующих импульса за каждый оборот вращения диска.

Сравнение данных двух вариантов ДЧПО показывает, что оптический датчик проще, надежнее и имеет меньшие габариты, чем магнитоиндукционный датчик.

Возможны два варианта реализации метода трехтактного интегрирования, основанные на использовании одного или двух счетчиков импульсов и двух дешифраторов. Рассмотрим схему реализации на одном счетчике импульсов и дешифраторе как наиболее простую.

Исходя из результатов моделирования полосу пропускания фильтров выбираем в пределах 3–4 кГц;  $f = 340 / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны, равная размеру резца (0,1 м), а  $f = 3400$  Гц.

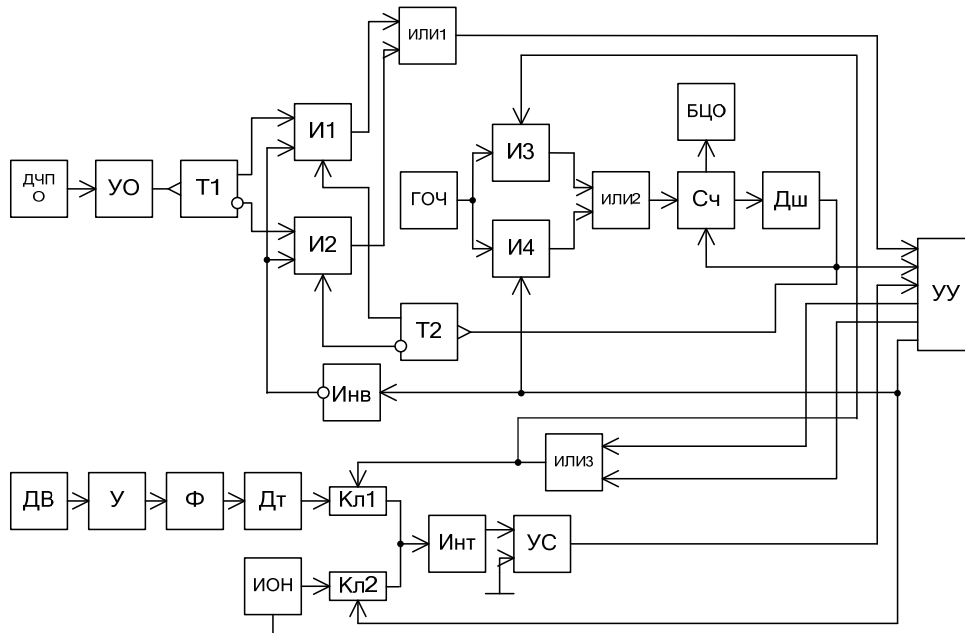
Структурная схема устройства представлена на рис. 3,а. Устройство содержит: датчик числа полуоборотов шпинделя станка – ДЧПО; усилитель-ограничитель – УО; датчик вибраций – ДВ; усилитель – У; фильтр – Ф; детектор – Дг; два триггера Т1 и Т2; две схемы совпадения на три входа И1 и И2; схему собирания на два входа – ИЛИ1; инвертор – Инв; счетчик импульсов – Сч; блок цифрового отсчета – БЦО; устройство управления – УУ; генератор образцовой частоты – ГОЧ; две схемы совпадения на два входа – И3 и И4; три схемы собирания на два входа – ИЛИ2, ИЛИ3, ИЛИ4; дешифратор – ДШ; два аналоговых ключа – Кл1, Кл2; интегратор – Инт; устройство сравнения – УС и источник опорного напряжения – ИОН.

В устройстве используется метод трехтактного последовательного интегрирующего преобразования. Интегрирование входного сигнала, содержащего помехи двух частот, производится за два первых последовательных равных такта, длительность которых кратна периоду сетевой помехи с частотой  $\omega_{п1}$ . Поэтому напряжение первой помехи с частотой  $\omega_{п1}$  будет полностью подавлено за время интегрирования первых двух тактов. При времени сдвига этих двух тактов, равном половине периода напряжения второй помехи с частотой  $\omega_{п2}$ , к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегратор разряжается от источника опорного напряжения, что реализуется преобразованием «напряжение – время». Заполняя этот интервал времени импульсами образцовой частоты, получим цифровой эквивалент  $N_x$  измеряемого напряжения. Для получения времени сдвига начала первых двух тактов интегрирования, равного половине периода второй частоты помехи  $\omega_{п2}$ , необходимо, чтобы начало второго такта интегрирования совпадало с приходом первого четного импульса второй частоты помехи. В качестве датчика числа полуоборотов шпинделя станка используется оптический датчик. Синхронизация работы устройства производится импульсами с выхода оптического датчика при вращении шпинделя станка.

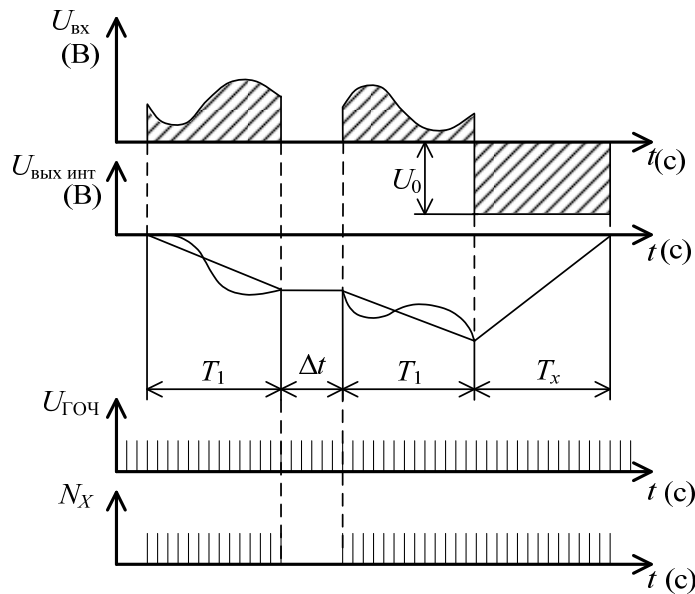
Действительно, результат интегрирования напряжения  $U_x$  полезного сигнала от процесса резания резца и помехи  $U_{п2} \sin \omega_{п2} t$  за первых два такта от вращения заготовки равен

$$U_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_1} (U_x + U_{п2} \sin \omega_{п2} t) dt + \frac{1}{\tau} \int_{T_1+\Delta t}^{2T_1+\Delta t} (U_x + U_{п2} \sin \omega_{п2} t) dt, \quad (5)$$

где  $\tau$  – постоянная времени входной цепи интегратора;  $\Delta t$  – интервал времени после окончания первого такта интегрирования до момента появления первого четного импульса с выхода ДЧПО.



а)



б)

Рис. 3. Структурная схема устройства трехтактного интегрирования (а); временная диаграмма работы устройства трехтактного интегрирования (б)

Интервал времени  $\Delta t$  находится в диапазоне  $0 < \Delta t < T_{п2}$ , где  $T_{п2}$  – период вращения шпинделя станка. Причем если момент окончания первого такта

интегрирования попадает на нечетный полуоборот вращения шпинделя станка, то  $\Delta t < T_{п2}/2$ , а если момент окончания первого такта интегрирования попадает на четный полуоборот вращения шпинделя станка, то  $T_{п2}/2 < \Delta t < T_{п2}$ .

После подстановки пределов интегрирования в выражение (5) сумма вторых слагаемых обращается в нуль, тогда

$$U_1 = 2U_x T_1 (\tau)^{-1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что напряжение на выходе интегратора пропорционально измеряемому напряжению  $U_x$  и длительности двух первых тактов интегрирования  $T_1$ . Разряжая интегратор в течение третьего такта интегрирования от источника опорного напряжения  $U_0$ , получим

$$U_1 = 2U_x T_1 \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau} \int_0^{T_x} U_0 dt = 0. \quad (7)$$

Откуда значение интервала времени будет равно  $T_x = 2T_1 U_x (U_0)^{-1}$ . Заполняя его частотой генератора образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент измеряемого напряжения:

$$N_x = T_x (T_0)^{-1} = 2T_1 (U_0 T_0)^{-1} U_x. \quad (8)$$

Работает устройство следующим образом. При включении напряжения питания устройством управления УУ производится сброс триггеров Т1, Т2 и счетчика импульсов Сч в нулевое состояние. Наличие двух разрешающих сигналов с выходов триггера Т2 и инвертора Инв, поступающих на входе схемы совпадения на три входа И1, подготавливает ее к работе. При появлении первого импульса на выходе датчика числа полуоборотов шпинделя станка ДЧПО через усилитель – ограничитель УО – взводится первый триггер Т1, и сигнал с его выхода через схему совпадения на три входа И1 и схему собирания на два входа ИЛИ1 синхронизирует работу устройства управления УУ. Чтобы импульсы с выхода датчика числа полуоборотов вращения шпинделя станка ДЧПО не влияли на работу устройства управления УУ, сигнал первого такта интегрирования  $\phi_1$  с выхода устройства управления УУ через схемы собирания на два входа ИЛИ3 и ИЛИ4 подается на вход инвертора Инв, который закрывает схемы совпадения на три входа И1 и И2 на длительность тактов интегрирования  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и  $\phi_3$ . Тем же сигналом  $\phi_1$  через схему собирания на два входа ИЛИ3 открывается схема совпадения на два входа И3. Импульсы с выхода генератора образцовой частоты ГОЧ через схему совпадения на два входа И3 и схему собирания на два входа ИЛИ2 начнут проходить на вход счетчика Сч в течение всего первого такта.

Одновременно с этим замыкается первый аналоговый ключ Кл1, и напряжение  $U_{вх}$  с выхода виброакустического датчика ДВ через усилитель У, фильтр Ф и детектор Дт подается на вход интегратора Инт и интегрируется.

По окончании первого такта  $\phi_1$  срабатывает дешифратор Дш, который сбрасывает счетчик Сч в состояние «0», а триггер Т2 – в состояние «1». Одновременно сигнал дешифратора Дш подается на второй вход устройства управления УУ, регистрируя окончание первого такта интегрирования. По-



этому сигналы состояния «1» с выходов инвертора Инв и триггера Т2 подготавливают к работе схему совпадения на три входа И2. При появлении с выхода датчика числа полуоборотов шпинделя станка первого четного импульса триггер Т1 перейдет в состояние «0», и сигнал с его инверсного выхода через открытую схему совпадения на три входа И2 и схему собирания на два входа ИЛИ1 синхронизирует начало второго такта интегрирования  $\varphi_2$  устройством управления УУ. Со сдвигом в полпериода частоты вращения шпинделя станка относительно начала первого такта интегрирования аналогично происходит интегрирование входного сигнала во втором такте  $\varphi_2$ .

После его окончания при повторном срабатывании дешифратора Дш сигналом с его выхода выполняется повторный сброс счетчика импульсов Сч, подается сигнал на устройство управления УУ об окончании второго такта интегрирования  $\varphi_2$  и выдается сигнал  $\varphi_3$  – начало третьего такта интегрирования. Аналоговый ключ Кл1 размыкается, интегратор Инт отключается от источника входного сигнала. Сигнал управления  $\varphi_3$  подключает источник опорного напряжения ИОН через аналоговый ключ Кл2 к входу интегратора Инт. Напряжение  $U_0$  начнет разряжать интегратор Инт. Одновременно с этим открывается дополнительная схема совпадения на два входа И4, и импульсы генератора образцовой частоты ГОЧ начнут проходить на вход счетчика Сч до тех пор, пока интегратор Инт не разрядится до нуля. Сигнал об окончании третьего такта интегрирования с выхода устройства сравнения УС подается на третий вход устройства управления УУ. На этом измерение заканчивается. Код в счетчике импульсов Сч регистрируется блоком цифрового отсчета БЦО и соответствует износу режущего инструмента.

Временная диаграмма работы устройства трехтактного интегрирования входного сигнала представлена на рис. 3,б.

Напряжение сетевой помехи будет подавлено, так как длительность тактов  $T_1$  кратна периоду сетевой помехи (20 мс). Как видно из временной диаграммы, за время двух тактов общей длительностью  $2T_1$  будет полностью подавлено и напряжение частоты  $\omega_{п2}$ , а к окончанию третьего такта вольт-секундные площади равны  $U_0 T_x = 2U_x T_1$ .

При реализации второго варианта устройства трехтактного интегрирующего преобразования, основанного на использовании двух счетчиков импульсов и двух дешифраторов, схема прибора несколько усложнится при сохранении тех же метрологических и эксплуатационных характеристиках.

Для выявления возможностей виброакустического контроля состояния режущего инструмента по анализу вибраций зоны резания была проведена серия экспериментов (при этом использовался стандартный пьезоакселерометр типа АНС-31). Были сняты виброакустические амплитудно-частотные характеристики от режимов резания и размерного износа режущей кромки резца. В эксперименте в широких пределах изменялась глубина резания  $t$ , подача  $S$  и число оборотов  $n$ , использовались заготовки из различных металлов с разными физико-механическими свойствами: сталь, латунь, дюралюминий. Точение заготовок проводилось однолезвийным резцом Т15К6 на станках типа 16К20 и ТПК-125.

Резец имел следующие геометрические размеры: ширина 10 мм, толщина 12 мм, углы:  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\gamma = 18^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ .

Прибор реагировал только на виброакустические колебания, возникающие при точении деталей. Размерный износ резца регистрировался по показаниям микрометрической головки.

Зависимость выходного напряжения вибросигнала от величины размерного износа резца  $h_p$  при точении стали приведена на рис. 4.

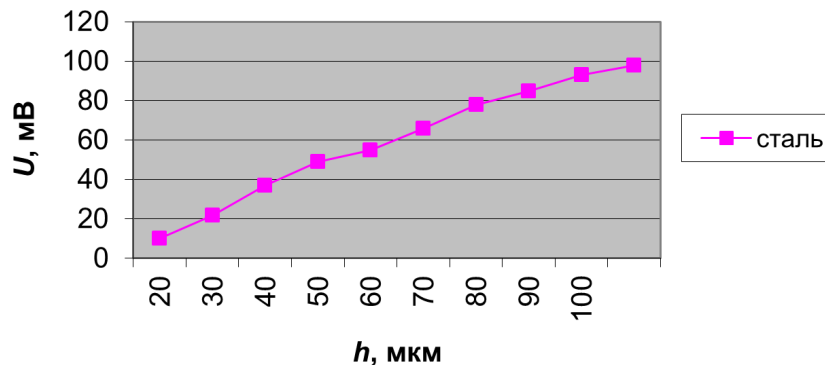


Рис. 4. Зависимость виброакустического сигнала от размерного износа режущего инструмента при точении стальной заготовки

### Заключение

Результаты математического моделирования напряженности акустического поля в теле резца и экспериментальные исследования изменения напряжения вибросигнала от величины износа режущего инструмента подтвердили возможность измерения размерного износа. Полученные результаты позволили создать приборы измерения размерного износа резцов для станков с ЧПУ.

### Список литературы

1. Добровинский, И. Р. Автоматический контроль состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ/ И. Р. Добровинский и др. // Станки и инструмент. – 1987. – № 3. – С. 16–18.
2. Медведик, М. Ю. Субиерархический метод решения интегрального уравнения на плоских экранах произвольной формы / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 4. – С. 49–55.
3. Медведик, М. Ю. Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2010. – № 4. – С. 82–88.
4. Субиерархический метод решения задачи дифракции электромагнитных волн на диэлектрическом теле в прямоугольном волноводе / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 8. – С. 940–945.
5. Медведик, М. Ю. Субиерархический параллельный вычислительный алгоритм для решения задач дифракции электромагнитных волн на плоских экранах / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 441–446.
6. Медведик, М. Ю. Применение субиерархического метода в задачах электродинамики / М. Ю. Медведик // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т. 13. – С. 87–97.

7. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера на телах сложной формы / М. Ю. Медведик // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 2. – С. 175–180.
8. Пат. № 2263300 Россия. Устройство для измерения износа режущего инструмента / Добровинский И. Р. Белолопотков Д. А., Медведик Ю. Т., Чувькин Б. В. – Опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.

### References

1. Dobrovinskiy I. R., et al. *Stanki i instrument* [Machine tools and instruments]. 1987, no. 3. pp. 16–18.
2. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region, Physical and mathematical sciences]. 2009, no. 4, pp. 49–55.
3. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region, Physical and mathematical sciences]. 2010, no. 4, pp. 82–88.
4. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2011, vol. 56, no. 8, pp. 940–945.
5. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2008, vol. 53, no. 4, pp. 441–446.
6. Medvedik M. Yu. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computing methods in programming]. 2012, vol. 13, pp. 87–97.
7. Medvedik M. Yu. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2012, vol. 57, no. 2, pp. 175–180.
8. Пат. № 2263300 Russian Federation. *Ustroystvo dlya izmereniya iznosa rezhushchego instrumenta* [Device for cutting tool wear estimation]. Dobrovinskiy I. R., Belolapotkov D. A., Medvedik Yu. T., Chuvykin B. V. 27.10.2004, no. 30.

---

#### **Добровинский Игорь Рувимович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники, Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: idobr@tl.ru

#### **Dobrovinskiy Igor' Ruvimovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information measuring  
technology, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

#### **Медведик Юрий Тимофеевич**

кандидат технических наук, старший  
преподаватель, кафедра электротехники  
и транспортного электрооборудования,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yura.medvedik@mail.ru

#### **Medvedik Yuriy Timofeevich**

Candidate of engineering sciences, senior  
lecturer, sub-department of electrical  
engineering and transport electrical  
equipment, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

#### **Медведик Михаил Юрьевич**

кандидат физико-математических наук,  
доцент, кафедра математики  
и суперкомпьютерного моделирования,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: medv@mail.ru

#### **Medvedik Mikhail Yur'evich**

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
sub-department of mathematics  
and supercomputer modeling, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

**Чапаев Вячеслав Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электротехники и транспортного  
электрооборудования, Пензенский  
государственный университет  
(г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [chapaev@mail.ru](mailto:chapaev@mail.ru)

**Chapaev Vyacheslav Sergeevich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of electrical  
engineering and transport electrical  
equipment, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 621.317.08

**Добровинский, И. Р.**

**Измерение износа резца виброакустическим методом и моделирование напряженности акустического поля внутри режущего инструмента / И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик, В. С. Чапаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 59–70.**