ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

Научная статья
УДК 621.923
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-45-58

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ДЛЯ СНЯТИЯ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Малышкин Дмитрий Александрович, Иноземцев Максим Александрович, Абабков Николай Викторович

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: dmitry01022007@yandex.ru

Аннотация.
В статье представлен алгоритм снятия характеристик режущего инструмента, выделенного для рассмотрения как слабое (маложесткое) звено станка, и последующего расчета с использованием последних параметров, определяющих степень устойчивости его работы при механической обработке поверхностей. Получение вышеназванных характеристик производилось с использованием комплекса для снятия и анализа экспериментальных данных, оснащенного современным микроконтроллерным оборудованием. К характеристикам режущего инструмента, определяющим динамику его работы, относятся: приведенная масса, коэффициенты приведенных жесткости и демпфирования. Данные коэффициенты определялись путем прямых и косвенных измерений, порядок которых представлен ниже. Комплекс для снятия и анализа экспериментальных данных содержит в своем составе установку для получения коэффициентов жесткости элементов режущего инструмента и установки для снятия значений виброускорений и регистрации значений шероховатости (установка смонтирована на базе станка «EqiptopETM-510 с системой ЧПУ Fanuc 01-MB»). При помощи вышеназванных установок удалось получить массивы значений, необходимых для динамического анализа режущего инструмента величин и дальнейшей их математической обработки. Для определения сил резания и установки их дальнейшей связи с режимами обработки в составе комплекса был предусмотрен динамометр трехосного исполнения УДМ-600. Оценка степени устойчивости работы режущего инструмента для рекомендации его дальнейшего использования осуществлялась по известному алгебраическому критерию Рауса-Гурвица [6], который является актуальным. Оценка степени устойчивости режущего инструмента на этапах подготовки машиностроительного производства дает возможность выбрать для дальнейшей обработки инструменты прогрессивных конструкций и тем самым повысить их стойкость (снизить затраты времени на смену инструмента), а также точность и качество выпускаемой продукции.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
09 июня 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
комплекс для снятия и анализа экспериментальных данных, параметры технологической системы, режущий инструмент, параметры шероховатости, массив виброускорений, массив виброперемещений, метод Ньютона-Котеса, алгебраический критерий Рауса-Гурвица, микроконтроллер, профилографирование

Для цитирования: Малышкин Д.А., Иноземцев М.А., Абабков Н.В. Прямые и косвенные измерения параметров технологической системы с использованием комплекса для снятия и анализа экспериментальных данных // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 45-58. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-45-58, EDN: WSTZLS

Постановка проблемы. При рассмотрении особенностей, характерных для процесса механической обработки многолезвийным режущим инструментом, которым, в частности, являются фрезы, видно, что он сопровождается ударами при внедрении зубьев в обрабатываемую деталь. Эти явления вызывают повышенные вибрации в зоне резания за счет согласования фаз отдельных гармоник переходных процессов, что в дальнейшем приводит к потере устойчивости режущего инструмента, а впоследствии к снижению точности и качества обработки. На интенсивность вибрационных явлений в зоне резания также влияет выбор режимов резания, которые участвуют в формировании зависимостей, по которым рассчитываются силы резания, являющиеся одним из основных возбуждающих колебания факторов. По этой причине технологу часто приходится занижать режимы резания, в частности подачу инструмента, и тем самым снижать производительность обработки детали. Особенно это актуально для деталей с труднодоступными участками.

Вышеназванные обстоятельства требуют применения режущего инструмента улучшенных конструкций (с учетом того, что технологу часто приходится выбирать инструмент, полагаясь на интуицию), позволяющего обрабатывать детали без существенного занижения режимов резания. Предварительная проверка такого инструмента на устойчивость работы позволит технологу сделать выбор более прогрессивных (в плане снижения виброактивности) его конструкций и назначить, в свою очередь, оптимальные режимы обработки.

Таким образом, разработка методики, учитывающей вышеназванные обстоятельства и позволяющей сократить сроки проектирования технологических процессов, является актуальным и своевременным. Для повышения оперативности снятия и анализа экспериментальных данных необходимо применять современное высокоточное оборудование, способное хранить для последующей обработки достаточно большие объемы информации.

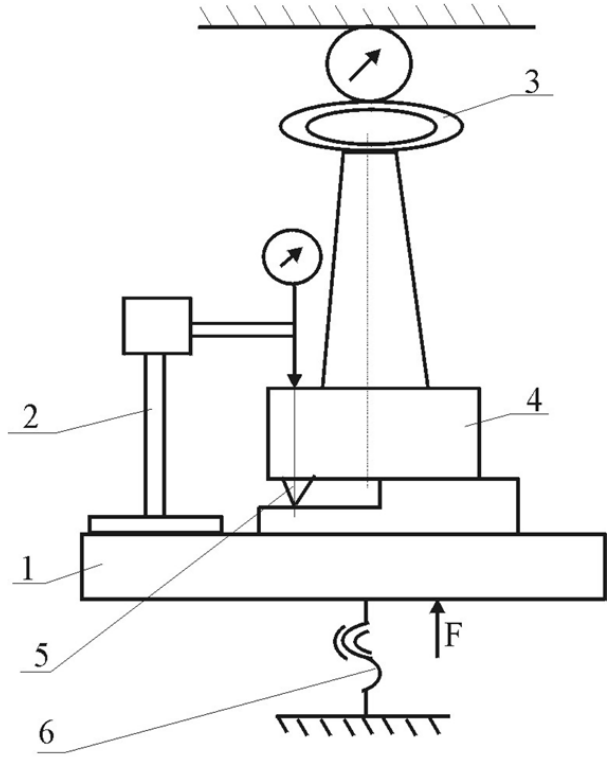


Рис. 1. Установка для получения коэффициентов жесткости элементов режущего инструмента: 1 – подъемный стол для приложения нагрузки к испытуемому элементу; 2 – стрелочный индикатор; 3 – динамометр ДОСМ 3 – 0,2; 4 – корпус режущего инструмента; 5 – режущая пластинка; 6 – винт для корректировки прилагаемого усилия

Fig. 1. Setup for obtaining the stiffness coefficients of cutting tool elements: 1 – lifting table for applying load to the test element; 2 – dial indicator; 3 – dynamometer DOSM 3 – 0.2; 4 – cutting tool body; 5 – cutting plate; 6 – screw for adjusting the applied force

Анализ исследований и публикаций. Для проверки режущего инструмента на устойчивость работы, в частности, применяется алгебраический критерий Рауса-Гурвица [1, 2, 6], который является актуальным благодаря достаточной простоте использования, строго сформированному алгоритму и возможности проводить анализ, не углубляясь в решение сложных дифференциальных уравнений. Данный критерий проверки инструмента на устойчивость работы предусматривает расчеты, связанные с построением передаточных функций исследуемой системы «Режущий инструмент», учитывающих взаимодействия ее элементов посредством обратных связей [1, 2, 6]. Прямые и косвенные измерения параметров исследуемой системы «Режущий инструмент» включают в себя снятие и последующий расчет таких коэффициентов, как приведенная масса, приведенный коэффициент жесткости и приведенный коэффициент демпфирования [3, 4, 5, 14]. Использование данных коэффициентов в дальнейших расчетах позволит сформировать зависимости (определители, полученные из коэффициентов передаточной функции исследуемой системы) для выявления факта устойчивости работы режущего инструмента [2]. В дальнейшем параметры устойчивой работы

режущего инструмента использовались для корректировки высокопроизводительных режимов резания, позволяющих получить достаточные точность и качество обработки.

Целью статьи является знакомство с алгоритмом снятия и последующего расчета параметров режущего инструмента (приведенной массы, коэффициентов приведенной жесткости и демпфирования), характеризующих вибрационную картину в процессе резания с дальнейшими рекомендациями по корректировке режимов резания и выбору конструкций, обеспечивающих его устойчивую работу.

Изложение основного материала. Любая станочная система является системой геометрических, кинематических и силовых связей, посредством которых, от элемента к элементу, могут передаваться вибрации, вносящие в процесс резания нестабильность, приводящую, в свою очередь, к снижению точности и качества обработки поверхностей. Для достижения поставленной цели был спроектирован и смонтирован комплекс оборудования, состоящий из установок для определения коэффициентов жесткости (Рис. 1) и установки для получения значений виброускорений и регистрации переходных процессов (Рис. 2 и 5). Установка для Рис. 5 оснащена современным, высокоточным микроконтроллерным оборудованием, позволяющим оперативно зарегистрировать, обработать и сохранить необходимые для дальнейшего анализа данные.

Этапы реализации алгоритма снятия характеристик режущего инструмента следующие:

Определение коэффициентов приведенной жесткости.

Установка для определения коэффициентов приведенной жесткости режущего инструмента (Рис. 1) представляет собой упругую предварительно нагруженную систему, имеющую в своем составе подъемный стол для приложения нагрузки к испытуемому элементу, стрелочный индикатор (точность 0,01 мкм) для определения смещения элементов режущего инструмента при его нагружении, динамометр ДОСМ 3 – 02 системы Н. Г. Токаря для определения прилагаемых к испытуемому элементу усилий, а также непосредственно сам испытуемый элемент (режущий инструмент). Для определения искомых параметров режущий инструмент подвергался ступенчатому нагружению при помощи винта 6, сразу фиксировались усилия P_i (динамометр) и значения смещений элементов y_i (индикатор). Формировался массив значений вышеназванных величин и посчитанных в автоматическом режиме коэффициентов приведенной жесткости (зависимость (1).

$$C_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{P_i}{y_i} \quad (1)$$

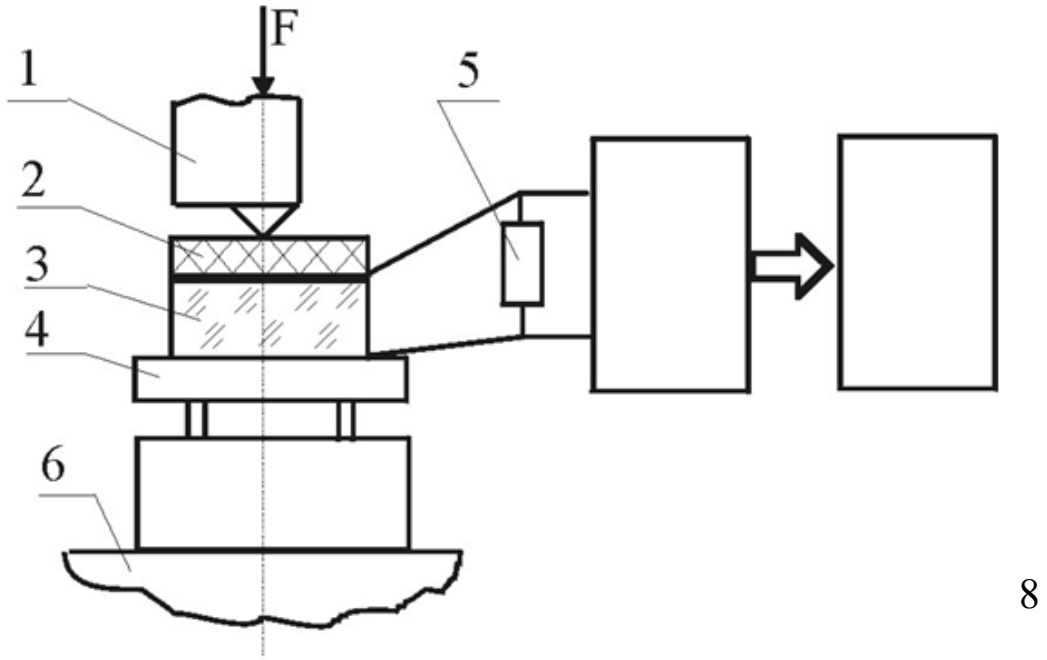


Рис. 2. Установка для снятия характеристик переходного процесса:
1 – режущий инструмент; 2 – диэлектрическая пластинка; 3 – пьезоэлемент, 4 – домкрат для создания предварительного нагружения; 5 – нагрузочное сопротивление;
6 – стол станка; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 — компьютер
Fig. 2. Setup for measuring transient response characteristics:
1 – cutting tool; 2 – dielectric plate; 3 – piezoelectric element; 4 – jack for creating a preliminary load; 5 – load resistor; 6 – machine table; 7 – analog-to-digital converter; 8 – computer

Значения коэффициентов приведенной жесткости элементов режущего инструмента определялись при нагружении и разгрузке (тоже ступенчатой). Кривые нагрузки и разгрузки не совпадали. Петля Гистерезиса, образованная при сопоставлении кривых нагрузки и разгрузки, характеризует энергию, накопленную исследуемой механической системой, которая в дальнейшем может негативно повлиять на устойчивость работы инструмента.

Для определения приведенной массы элементов и коэффициентов демпфирования использовалась установка, показанная на Рис. 2. Принцип работы данной установки следующий:

Предварительно нагруженный режущий инструмент подвергался ударному воздействию, имитирующему врезание режущей пластинки в обрабатываемую заготовку. При этом контакт режущей пластинки инструмента с поверхностью заготовки осуществлялся через пьезоэлемент 2, который является первичным преобразователем аналоговых сигналов (силовой воздействие) в электрические, пропорциональные виброперемещениям режущей пластинки.

Для регистрации графика переходного процесса возможно наблюдение выходного сигнала пьезоэлектрического преобразователя на экране осциллографа. Однако для удобства дальнейшей вычислительной обработки результатов измерений программным обеспечением и возможности снятия переходных характеристик для различных технологических систем была поставлена задача разработки измерительной установки на основе микроконтроллера.

Структурная схема подключения пьезоэлектрического преобразователя к микроконтроллеру приведена на Рис. 3. В состав схемы входят: пьезоэлектрический преобразователь 1, коаксиальный соединительный кабель 2, цепи предварительной

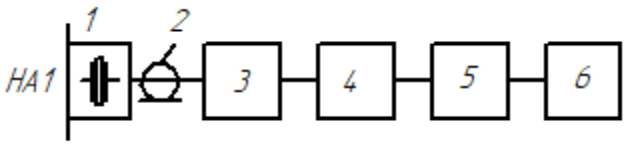


Рис. 3. Схема измерительного канала пьезоэлектрического преобразователя
Fig. 3. Schematic diagram of the measuring channel of the piezoelectric transducer

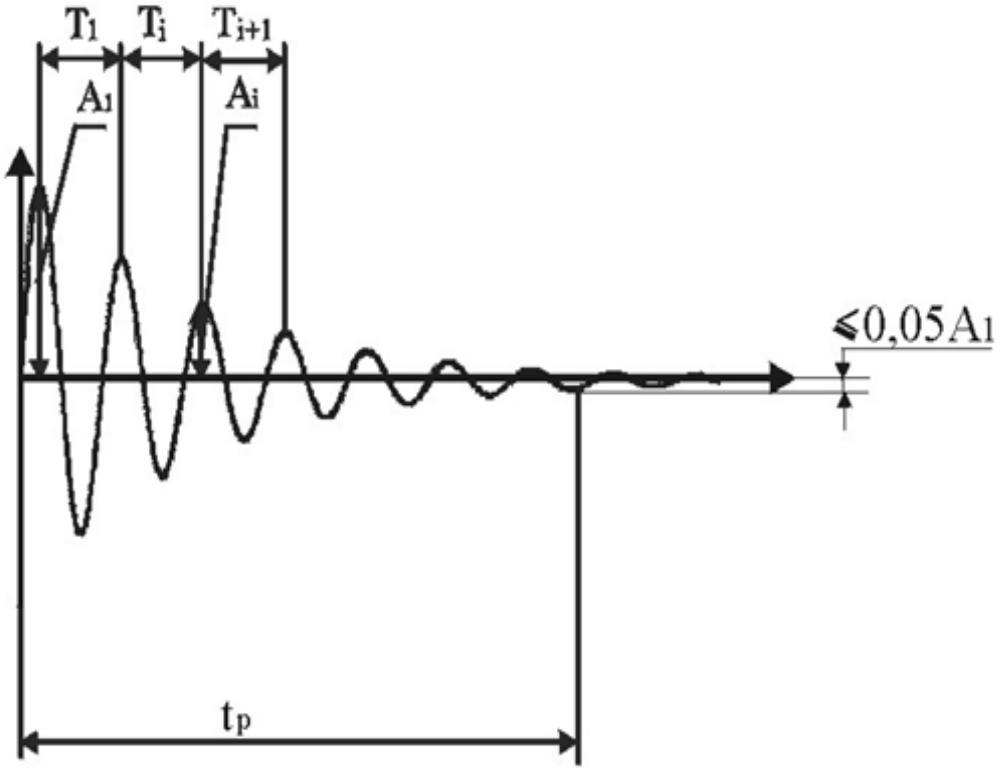


Рис. 4. График переходного процесса
Fig. 4. Transient process graph

обработки измерительного сигнала 3, усилитель 4, фильтр нижних частот 5, микроконтроллер 6. Схема обеспечивает усиление напряжения пьезоэлектрического преобразователя. С целью снижения влияния на результаты измерения параметров кабеля, соединяющего датчик и измерительную схему, его длина должна быть минимально возможной в конкретных условиях измерений [6, 7].

Для исключения влияния высокочастотных составляющих в схеме использован фильтр нижних частот с частотой среза 2 кГц [7]. Сигнал с измерительной схемы поступает на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера, после чего результаты измерений в виде массива мгновенных значений сохраняются в его внутренней памяти. По результатам измерений строились графики переходных процессов (Рис. 4) инструментов различных конструкций.

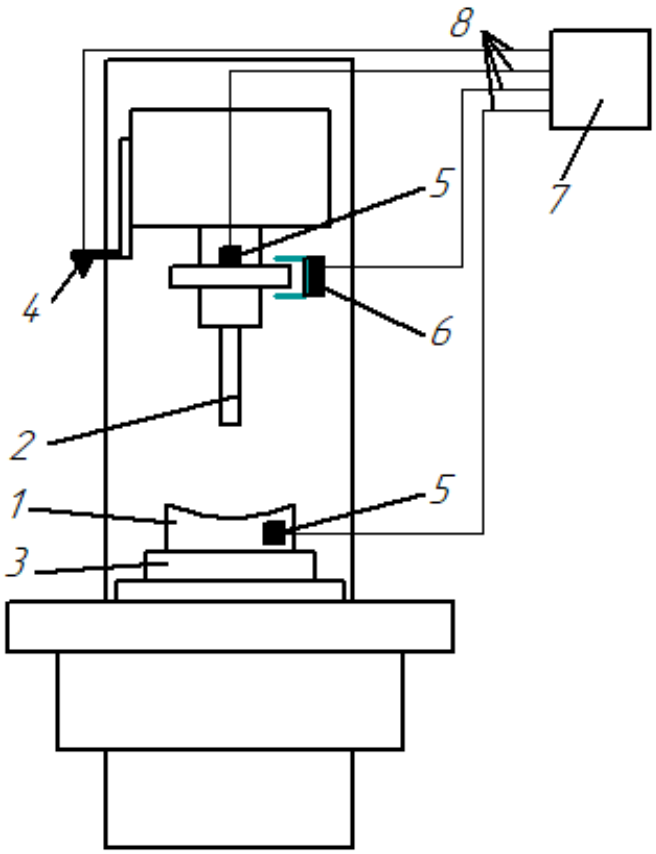


Рис. 5. Схема установки для снятия значения виброускорений и регистрации значений шероховатости
1 – деталь, 2 – режущий инструмент, 3 – динамометр УДМ-600, 4 – щуп для измерения шероховатости поверхности, 5 – акселерометр, 6 – датчик фазового положения, 7 – блок микроконтроллеров, 8 – соединительные кабели
Fig. 5. Schematic diagram of the setup for measuring vibration acceleration and recording roughness values
1 – component, 2 – cutting tool, 3 – UDM-600 dynamometer, 4 – surface roughness measuring probe, 5 – accelerometer, 6 – phase position sensor, 7 – microcontroller unit, 8 – connecting cables

Общий вид выражения переходного процесса:

$$y(t) = A_0 e^{-nt} sin\,(\omega_{зат} + \varphi_0), \quad (2)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний, $\omega_{зат}$ – круговая частота колебаний режущего инструмента; φ_0 – начальная фаза переходного процесса, n – коэффициент сопротивления среды,

- круговая частота затухающих колебаний режущего инструмента:

$$\omega_{зат} = \sqrt{\omega_0{}^2 - n^2}\,, \quad (3)$$

- круговая частота свободных колебаний режущего инструмента в $с^{-1}$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}} \quad (4)$$

- время переходного процесса:

$$T = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} T_i \quad (5)$$

- декремент колебаний режущего инструмента:

$$\xi = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} \ln\frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (6)$$

- приведенная масса:

$$m = T^2 C \quad (7)$$

- коэффициент демпфирования:

$$G = \frac{2m\xi}{T} \quad (8)$$

Зарегистрированные в результате экспериментов значения виброперемещений режущего инструмента позволили построить соответствующие графики, показывающие интенсивность и продолжительность вибрационных процессов перед дальнейшим возмущением от врезания режущей пластинки. Данные показатели определялись для инструментов различных конструкций и предварительно отбирался вариант для дальнейшего исследования на устойчивость [1, 15, 16, 17]. В дальнейшем выбранный инструмент рассчитывался на устойчивость по предварительно определенным коэффициентам m, C, G и рекомендовался для дальнейшего использования в технологическом процессе.

Для оценки адекватности предложенных решений реальному процессу обработки необходимо провести обработку заготовки на рекомендованных режимах. Установка (Рис. 5), смонтированная на базе станка «EqiptopETM-510 с системой ЧПУ Fanuc 01-MB», позволила в процессе обработки

заготовки снять массив значений виброускорений.

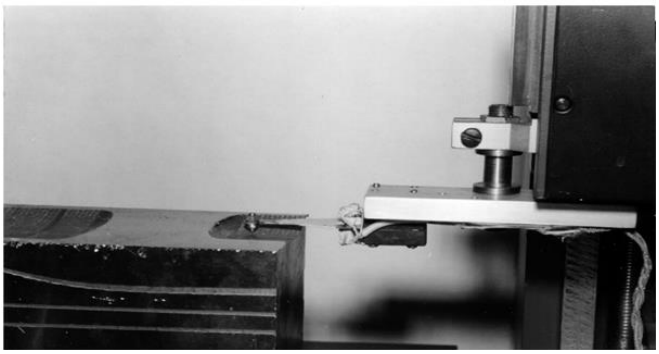
По данным значениям строился график и преобразовывался в кривую перемещений режущего инструмента путем двойного интегрирования. Для регистрации сигналов установка была оснащена следующими датчиками (Рис. 5): щуп с тензорезисторами для измерения шероховатости поверхности *4*; два датчика виброускорения *5* (акселерометры); оптико-механический датчик угла поворота и фазового положения *6*.

На незначительном расстоянии от станка, за пределами рабочей области установлен микроконтроллерный блок измерительной установки, который осуществляет измерение, первичную обработку и хранение результатов измерений.

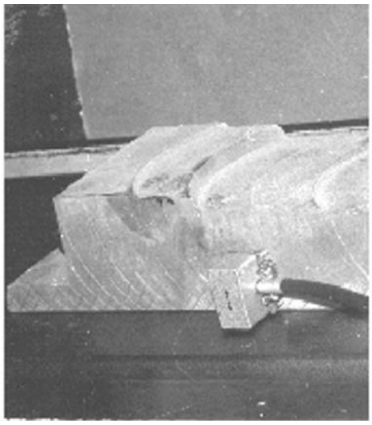
Эффективность применения рекомендуемых конструкций режущего инструмента во многом определяется показателями микронеровностей обработанной поверхности. Значения микронеровностей обработанной поверхности получались путем профилографирования по отдельным сечениям детали. Для измерения микронеровностей поверхности использован измерительный щуп [22], представляющий собой упругую пластинку длиной 20 мм, шириной основания 14 мм и толщиной 0,55 мм, выполненную из закаленной стали 65Г. На пластинке размещен твердосплавный радиусный наконечник. Принцип измерения микронеровностей основан на измерении деформации пластинки при ее перемещении по исследуемой поверхности. Для этого на двух сторонах пластинки размещены тензорезисторы. В зависимости от величины шероховатости изменяется деформация пластинки, а значит, и сопротивление тензорезисторов. Дальнейшая обработка измерений производится микроконтроллером, поэтому изменение сопротивления необходимо преобразовать в изменение напряжения [23]. Для этого использована полумостовая схема соединения тензорезисторов (Рис. 6). Кроме того, полумостовая схема позволяет осуществлять измерения с большей точностью, чем схема с одним тензорезистора. Выходное напряжение данной схемы определяется выражением (9)

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{K(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{4}, \quad (9)$$

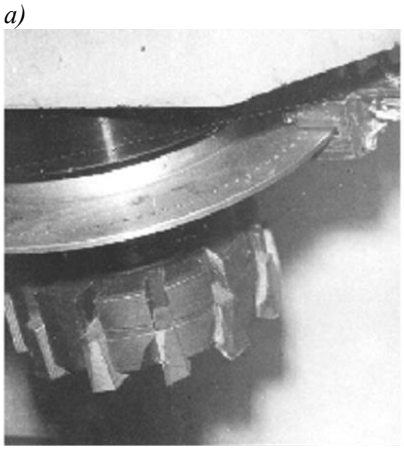
где $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания моста,



а)



б)



в)

Рис. 6. Элементы установки для замера шероховатости и получения массива виброускорений: а – измерительный щуп для замера шероховатости; б – акселерометр; в – датчик фазового положения

Fig. 6. Components of the setup for measuring roughness and obtaining a vibration acceleration array: a – roughness measuring probe; b – accelerometer; c – phase position sensor

выбрано равным 3,3 В; K – коэффициент чувствительности тензорезистора; ε_1, ε_3 – относительные деформации тензорезисторов, определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (10)$$

где Δl – Δl, l0 – изменение длины и начальная длина тензорезистора соответственно.

Для измерения выходного напряжения моста использована специализированная микросхема AD7788 [8]. Выходной сигнал микросхемы цифровой, что позволяет непосредственно подключать ее к микроконтроллеру [7]. Опрос датчика происходит через определенные промежутки времени $\Delta\tau_i$, значение которого зависит от координаты B_i профилографируемого сечения $\Delta\tau_i$,=arccos(2B$_i$ / (B-1)·2·f). Применение тензорезисторов с линейной деформационной характеристикой позволяет получить линейные тарировочные графики первичного преобразователя микронеровностей поверхности.

Для исключения влияния переходных на результаты измерений щуп подбирался таким образом, чтобы частота его собственных колебаний была на порядки выше частоты его вынужденных колебаний, возбуждающихся в результате профилографирования. Для получения достоверных результатов щуп был оттарирован.

Акселерометры (Рис. 6, б), установленные для регистрации виброускорений, имеют трехосевое исполнение, что позволяет снимать значения последних в трех взаимно перпендикулярных направлениях [18].

В качестве датчика ускорений использован акселерометр ADXL345 [12, 25, 26], полоса пропускания которого составляет 0,05 … 1600 Гц, что позволяет его применять для измерения низкочастотных вибраций [20, 21]. Так как выходной сигнал датчика цифровой, то он не

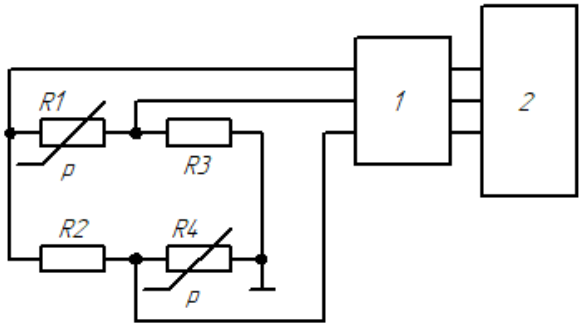
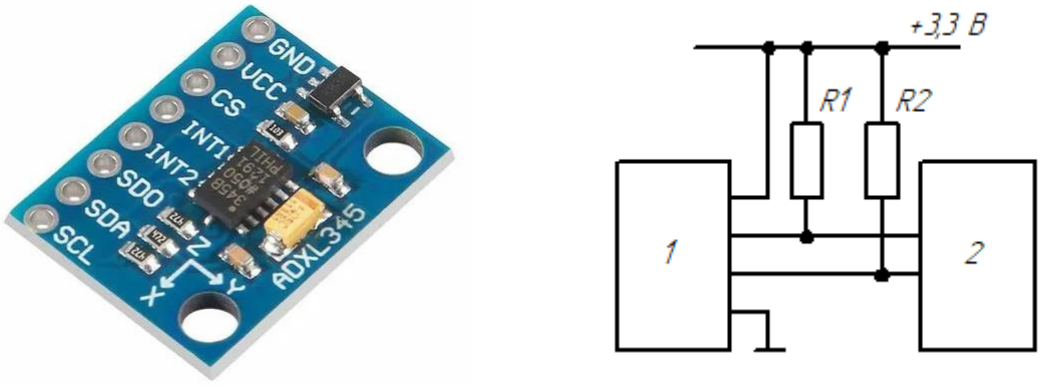


Рис. 7. Схема подключения тензорезисторного полумоста к АЦП и микроконтроллеру: R1, R4 – тензорезисторы; R2, R3 – постоянные резисторы; 1 – микросхема AD7788; 2 – микроконтроллер

Fig. 7. Connection diagram of the strain gauge half-bridge to the ADC and microcontroller: R1, R4 – strain gauges; R2, R3 – fixed resistors; 1 – AD7788 microcircuit; 2 – microcontroller



а) б)

Рис. 8. Серийно выпускаемый отладочный модуль акселерометра ADXL345 (а) и схема его подключения к микроконтроллеру (б): R1, R2 – постоянные резисторы; 1 – модуль акселерометра; 2 – микроконтроллер

Fig. 8. The ADXL345 accelerometer debug module (a) and its connection diagram to the microcontroller (b):
R1, R2 – fixed resistors; 1 – accelerometer module; 2 – microcontroller

требует дополнительных цепей при подключении к микроконтроллеру. Для удобства при разработке макета использован серийно выпускаемый отладочный модуль акселерометра (Рис. 8).

В результате проведения измерений был получен массив значений виброускорения, который также сохранялся в памяти микроконтроллера.

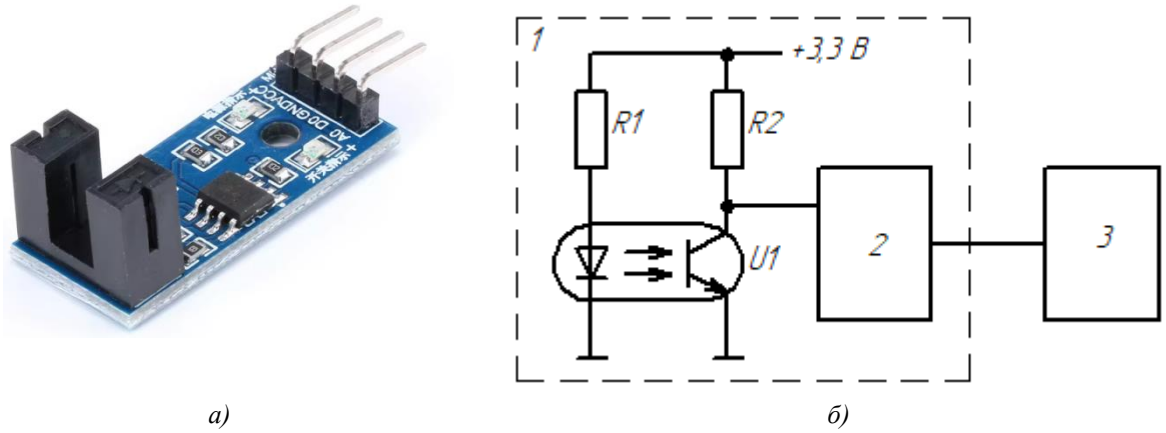
Датчик фазового положения (Рис. 6, в), входящий в состав установки (Рис. 5), использовался для регистрации значений виброускорений и определения текущего положения режущего инструмента. Он включает в себя излучатель и приемник сигналов, принцип действия которых основан на законах инфракрасного излучения. Излучатель – инфракрасный светодиод, приемник – инфракрасный фототранзистор.

Импульсы на выходе датчика формируются генератором импульсов, который представляет собой стальной диск диаметром 150 мм, толщиной 1,5 мм. На его торцовой поверхности по окружности выполнены сквозные отверстия: 119 отверстий диаметром 1 мм (отметчики фазы) и одно отверстие диаметром 2 мм (отметчик оборота). Диск жестко закреплен на инструментальной оправке таким образом, чтобы при прохождении света от излучателя к фотодиоду через отверстие отметчика оборота угол контакта с заготовкой зуба фрезы, принятого за первый, был равен нулю.

Измерение углового положения шпинделя и определение полного его оборота основано на регистрации наличия или отсутствия светового потока от светодиода к фототранзистору при вращении диска. Если световой канал перекрыт диском, то на выходе датчика формируется логическая единица. При повороте диска, когда оптический сигнал с фотодиода через отверстие в диске поступает на фототранзистор, на выходе датчика формируется логический ноль. Момент переключения с логической единицы на логический ноль обрабатывается микроконтроллером, при этом каждый последующий импульс увеличивает счетчик фазы до тех пор, пока не будет зарегистрирован импульс от отметчика оборота, после чего счетчик фазы программно устанавливается в нулевое значение. Таким образом, номер импульса отметчика фазы однозначно определяет угловое положение шпинделя, и за время его полного оборота шпинделя измеряется 120 значений виброускорения с каждого акселерометра. Стоит также отметить, что повышение точности измерения углового положения возможно осуществить, используя соответствующие методы измерений и датчики, обеспечивающие измерение угла с погрешностью, равной сотым долям градуса [24].

С каждым оборотом режущего инструмента массив значений виброускорений пополнялся на 240 позиций (сигналы считывались с каждого датчика). По полученным с каждого датчика значениям виброускорений строились соответствующие графики, которые, в свою очередь, дважды интегрировались по методу Ньютона-Котеса [15] для получения массива виброперемещений и сопоставления последних со значениями параметров шероховатости, полученных экспериментальным путем при помощи профилометра. В дальнейшем в качестве оптимального варианта выбирался тот инструмент, который в общем случае обеспечивал сравнительно небольшие высотные показатели шероховатости. Работа такого инструмента считалась более устойчивой.

В качестве формирователя импульсов для



а) *б)*

Рис. 9. Внешний вид модуля датчика ДФП (а) и схема подключения его к микроконтроллеру (б): 1 – модуль датчика; 2 – компаратор; 3 – микроконтроллер; R1, R2 – постоянные резисторы; U1 – инфракрасная диодно-транзисторная оптопара

Fig. 9. External appearance of the DFP sensor module (a) and the diagram of its connection to the microcontroller (b): 1 – sensor module; 2 – comparator; 3 – microcontroller; R1, R2 – fixed resistors; U1 – infrared diode-transistor optocoupler

считывания их микроконтроллером был использован серийно выпускаемый модуль инфракрасной оптопары с компаратором на базе операционного усилителя. Упрощенная структурная схема модуля приведена на Рис. 9.

По полученным с помощью динамометра, входящего в состав установки (Рис. 5), данным был получен массив значений сил резания, с помощью которых в дальнейшем определялись значения вибросмещений элементов фрезы и обрабатываемой поверхности. Динамометр включает в свой состав тензорезисторы, соединенные по полумостовой схеме [8].

Считывание данных с АЦП [7, 8] осуществлялось по прерыванию, формируемому микроконтроллером при смене логических уровней на выходе ДФП. Тарирование тракта производилось ступенчатым статическим нагружением в направлении каждой из измеряемых составляющей.

Все рассмотренные выше измерительные схемы предусматривают подключение к микроконтроллеру для сбора и хранения результатов измерений. Структурная схема измерительной установки приведена на Рис. 10.

В качестве вычислительного модуля выбран

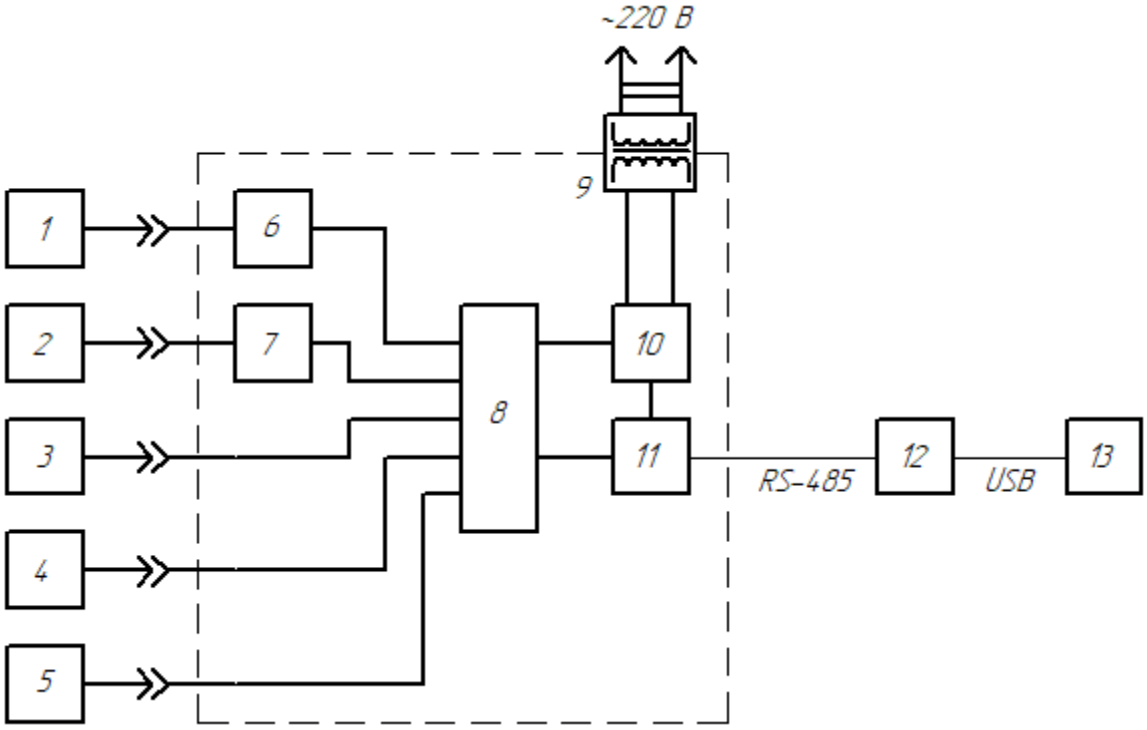


Рис. 10. Структурная схема микроконтроллерного блока измерительной установки (элементы управления не показаны): 1 – Пьезоэлектрический преобразователь; 2 – Тензометрический мост; 3, 4 – акселерометры, 5 – датчик фазового положения; 6,7 – схемы обработки сигналов пьезоэлектрического преобразователя и тензометрического моста соответственно; 8 – микроконтроллер; 9 – трансформатор питания; 10 – источник питания измерительной установки; 11, 12 – преобразователи интерфейсов; 13 – персональный компьютер

Fig. 10. Structural diagram of the microcontroller unit of the measuring setup (control elements are not shown): 1 – Piezoelectric transducer; 2 – Strain gauge bridge; 3, 4 – accelerometers, 5 – phase position sensor; 6, 7 – circuits for processing signals from the piezoelectric transducer and strain gauge bridge, respectively; 8 – microcontroller; 9 – power transformer; 10 – power supply of the measuring setup; 11, 12 – interface converters; 13 – personal computer

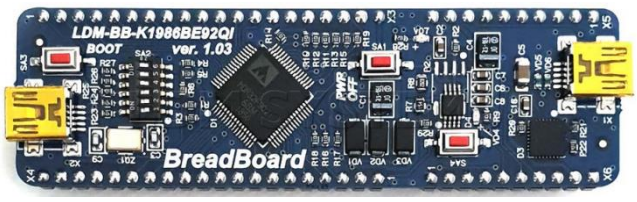


Рис. 11. Отладочная плата микроконтроллера К1986ВЕ92QI [13]

Fig. 11. Debug board of the K1986BE92QI microcontroller [13]

отечественный 32-разрядный микроконтроллер К1986ВЕ92QI [11]. Макет измерительной установки собран на базе отладочной платы микроконтроллера, изображенной на Рис. 11 [10, 12, 13].

Конструктивно микроконтроллерный блок измерительной установки выполнен в модульном исполнении в виде печатной платы, на которой установлена отладочная плата микроконтроллера и расположены необходимые для него и измерительных схем вспомогательные цепи. В состав схемы основной платы также входят источники питания цепей микроконтроллера и измерительных схем, плата преобразователя интерфейсов, кнопки управления и вспомогательные элементы. Подключение датчиков выполняется через контакты разъемов, что делает измерительную схему более гибкой, позволяя отключать при необходимости неиспользуемые измерительные цепи. Питание платы осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В через понижающий трансформатор, что обеспечивает гальваническую развязку от сети и повышает безопасность эксплуатации и надежность измерительной установки в целом.

Последующая обработка измерительной информации выполняется на персональной ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Так как не всегда возможно размещение персонального компьютера вблизи исследуемых установок, то для передачи данных от микроконтроллерного блока на компьютер целесообразно использовать интерфейс RS-485 и протокол ModBus. С этой целью к выводам интерфейса UART [7, 9] измерительного блока подключается преобразователь UART/RS-485, а на компьютере для приема данных использован преобразователь интерфейсов RS-485/USB. Для исключения влияния помех и предотвращения повреждения измерительного блока или компьютера использована гальваническая развязка.

Окончательная обработка экспериментальной информации осуществлялась на персональном компьютере.

Описанный в статье алгоритм определения характеристик режущего инструмента предполагает для получения необходимой информации использование современного технологического и регистрирующего оборудования. Принципиальные схемы предлагаемой установки для получения массива виброускорений и регистрации значений шероховатости предполагают использование высокоточного микроконтроллерного оборудования. Использование комплекса для снятия и анализа экспериментальных данных позволило получить результаты, приведенные ниже.

Выводы

1. Получены переходные характеристики процесса резания, накоплены массивы значений амплитуд колебаний, затухающих в течение времени, посредством которых были определены логарифмические декременты колебаний и в дальнейшем приведенные коэффициенты диссипации, являющиеся характеристиками устойчивости работы режущего инструмента. Также при помощи полученных характеристик переходных процессов была определена приведенная масса технологической системы, которая наравне с остальными параметрами также является элементом, характеризующим устойчивость.

2. Получен массив значений виброускорений, который посредством двойного интегрирования был преобразован в массив виброперемещений. Установлена адекватность представленных расчетов параметров, характеризующих шероховатость обработанной поверхности (виброперемещений) реально замеренному с помощью профилометра профилю микронеровностей. Погрешность не превысила 5%. Даны рекомендации по дальнейшему использованию инструмента в технологическом процессе как инструмента прошедшего проверку на устойчивость.

3. Предварительные исследования технологической системы позволяют сократить затраты времени на выбор конструкций режущего инструмента, отличающихся устойчивой работой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алпатов Ю. Н., Веревкин Л. В., Лисиенко В. А. Построение передаточной функции системы по формуле Мэзона в символьной форме // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1(33). С. 48–53. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-48-53. EDN YHHYRF.

2. Малышкин Д. А. Повышение производительности обработки пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем управления процессом формирования шероховатости: специальность 05.02.08 – Технология машиностроения: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Малышкин Дмитрий Александрович. Барнаул, 2003. 15 с.

3. Васильков Д. В., Александров А. С., Голикова В. В. Автоколебания при обработке резанием // Системный анализ и аналитика. 2018. № 3(8). С. 14–24. EDN YNNEGD.

4. Молчанов А. А. Повышение информационной эффективности вибрационных исследований металлорежущих станков на основе модального анализа нестационарных колебательных процессов : специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и

физико-технической обработки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Молчанов Александр Александрович. 2020. 175 с. EDN JZWNDY.

5. Колядин А. В. Устойчивость движения технологической системы станка при ступенчатом фрезеровании труднообрабатываемых материалов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л. : ЛПИ, 1982. 266 с.

6. Ларкин Е. В., Горшков А. А. Оценка устойчивости многоконтурных систем управления с помощью критерия Рауса-Гурвица // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 3–8. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-3-8. EDN ITQFHH.

7. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств : практическое руководство. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : ДМК Пресс, 2018. 626 с.

8. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Том II : практическое руководство. Пер. с нем. Карабашева Г. С. 13-е изд. Москва : ДМК Пресс, 2023. 943 с. Текст : электронный.

9. Линейные схемы. Руководство по проектированию [Текст] / ред. ориг. изд. Хэнк Цумбален. Пер. с англ. Султанова В. О. под ред. Власенко А. А. Москва : Техносфера, 2011. 1127 с.

10. Data Sheet AD7788/AD7789. Текст : электронный // chipdip.ru : [сайт]. URL: https://static.chipdip.ru/lib/981/DOC037981818.pdf (дата обращения: 21.04.2026). Режим доступа: свободный.

11. Digital Accelerometer ADXL345. Текст : электронный // chipdip.ru : [сайт]. URL: https://static.chipdip.ru/lib/362/DOC004362403.pdf (дата обращения: 21.04.2026). Режим доступа: свободный.

12. Микросхема 32-разрядного однокристального микро-ЭВМ с памятью Flash-типа К1986ВЕ92QI. Текст : электронный // chipdip.ru : [сайт]. URL: https://ic.milandr.ru/upload/iblock/9b1/8sye6gudsluy9r733y9d17afeh k4qf3q/%D0%9A1986%D0%92%D0%9592QI.pdf (дата обращения: 21.04.2026). Режим доступа: свободный.

13. Отладочная плата LDM-BB-K1986BE92QI. Текст : электронный // LDM Systems : [сайт]. URL: https://ldm-systems.ru/product/21201 (дата обращения: 21.04.2026). Режим доступа: свободный.

14. Задорин А. И., Задорин Н. А. Интерполяция Лагранжа и формулы Ньютона-Котеса на сетке Бахвалова при наличии пограничного слоя // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62. № 3. С. 355–366. DOI: 10.31857/S0044466922030140. EDN GSRURP.

15. Скуратов Д. Л., Бурмистров Е. В., Самыкин В. Н. Повышение виброустойчивости технологических систем при обработке двигателей летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2009. № 3–1(19). С. 200–206. EDN LADUHN.

16. Белобородов С. М. Методология обеспечения динамической устойчивости валопроводов высокоскоростных газотурбинных агрегатов на основе адаптационной сборки роторов : специальность 05.02.08 – Технология машиностроения : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Белобородов Сергей Михайлович. Рыбинск, 2011. 32 с. EDN QHMSKL.

17. Wierzbicki S. Visualization of vibrations in structural diagnoses of technical objects // Vibrations in Physical Systems. 2019. Vol. 30. Art. 2019205.

18. Dio W. A., Kasai H., Okiji A. Dynamical phenomena including many body effects at metal surfaces // Surface Science. 2002. Vol. 500. № 1–3. Pp. 105–126. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01568-0. EDN YKNBGW.

19. Al Dushaishi M. F., Stutts D. S. Vibration analysis of simultaneous drilling and reaming BHA // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. № 8. Pp. 3409–3417. DOI: 10.1007/s13202-020-00977-3. EDN AKXWBJ.

20. Orsingher E., D'ovidio M. Vibrations and Fractional Vibrations of Rods, Plates and Fresnel Pseudo-Processes // Journal of Statistical Physics. 2011. Vol. 145. № 1. Pp. 143–174. DOI: 10.1007/s10955-011-0309-5. EDN YWLZWZ.

21. Guo Jiang, Li Qikai, Qin Pu, Ankang Yuan, Lu Mingyang, Ke Xiaolong, Yicha Zhang, Cheung Benny. Internal surface finishing and roughness measurement: A critical review // Chinese Journal of Aeronautics. 2024. Vol. 38. DOI: 10.1016/j.cja.2024.11.013.

22. Bao-feng, Si-yuan, Cui-e, Bing-xian, Zhao-yao. Review of measurement methods for areal surface roughness // Optics and Precision Engineering. 2019. Vol. 27. Pp. 78–93. DOI: 10.3788/OPE.20192701.0078.

23. Xu Cun. Application Research of MEMS ADXL345 // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 457-458. Pp. 1550-1553. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.1550.

24. Teng Yuntian, Zhang Bingbing, Qiu Zhongchao, Hu Xingxing, He Zhaobo. High-sensitivity dual-FBG acceleration sensor for low frequency vibration measurement // Journal of Optics. 2023. Vol. 53. Pp. 2361–2373. DOI: 10.1007/s12596-023-01477-3.

25. Xie Jinxuan, Zhou Tong, Li Xiaoshi, Chen Yu, Yang Tianyu, Su Yan. A MEMS-Based Three-Ring Capacitive Angular Position Sensor With an Absolute Zero Position Feature // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2024. Vol. 72. Iss. 1. Pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIE.2024.3409884.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Об автор*ах:
Малышкин Дмитрий Александрович, доцент кафедры информационных технологий, машиностроения и автотранспорта, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» филиал в г. Прокопьевске, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19, а, к.т.н., доцент, e-mail: dmitry01022007@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1490-4890
Иноземцев Максим Александрович, старший преподаватель кафедры информационных технологий, машиностроения и автотранспорта ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», филиал в г. Прокопьевске, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19, а, e-mail: inozemcevma@kuzstu.ru
Абабков Николай Викторович, заведующий кафедрой технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, к.т.н., доцент, e-mail: n.ababkov@rambler.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0794-8040

Заявленный вклад авторов:
Малышкин Дмитрий Александрович – научный менеджмент, постановка исследовательской задачи, выводы, написание текста.
Иноземцев Максим Александрович – сбор и анализ данных, экспериментальные исследования, выводы, написание текста.
Абабков Николай Викторович – обзор соответствующей литературы, обработка результатов, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DIRECT AND INDIRECT MEASUREMENTS OF TECHNOLOGICAL SYSTEM PARAMETERS USING A COMPLEX FOR REMOVING AND ANALYZING EXPERIMENTAL DATA

Dmitry A. Malyshkin, Maksim A. Inozemtsev, Nikolay V. Ababkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: dmitry01022007@yandex.ru

Article info
Received:
09 June 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *complex for collecting and analyzing experimental data, parameters of the technological system, cutting tool, parameters of roughness,*

Abstract.
The complex for the removal and analysis of experimental data contains a unit for obtaining the coefficients of rigidity of the cutting tool elements and a unit for removing the values of vibration accelerations and recording the values of roughness (the unit is mounted on the basis of the EqiptopETM-510 machine with the Fanuc 01-MB CNC system). Using the above-mentioned units, it was possible to obtain arrays of values necessary for the dynamic analysis of the cutting tool and their further mathematical processing that determine its dynamic behavior include the reduced mass, reduced stiffness coefficients, and damping coefficients. These coefficients were determined through direct and indirect measurements, as described below. The complex for the removal and analysis of experimental data contains a unit for obtaining the coefficients of rigidity of the cutting tool elements and a unit for removing the values of vibration accelerations and recording the values of roughness (the unit is mounted on the basis of the EqiptopETM-510 machine with the Fanuc 01-MB CNC system). Using the above-mentioned units, it was possible to obtain arrays of values necessary for the dynamic analysis of the cutting tool and their further mathematical processing. To determine the cutting forces and establish their further connection with the processing

array of vibration accelerations, array of vibration displacements, Newton-Cotes method, algebraic Raus-Hurwitz criterion, microcontroller, profilography

modes, the complex included a three-axis dynamometer, the UDM-600. The assessment of the stability of the cutting tool's operation was carried out using the well-known algebraic Rauss-Gurwitz criterion [6], which is still relevant. The assessment of the stability of the cutting tool during the preparation stages of mechanical engineering production allows for the selection of advanced tool designs for further processing, thereby increasing their durability (reducing the time required for tool changes) and improving the accuracy and quality of the final product.

For citation: Malyshkin D.A., Inozemtsev M.A., Ababkov N.V. Direct and indirect measurements of technological system parameters using a complex for removing and analyzing experimental data. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):45-58. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-45-58, EDN: WSTZLS

REFERENCES

1. Alpatov Yu.N., Verevkin L.V., Lisienko V.A. Construction of the transfer function of a system using Mason's formula in symbolic form. *Systems. Methods. Technologies.* 2017; 1(33):48-53. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-48-53. EDN YHHYRF.

2. Malyshkin D.A. Increasing the productivity of processing spatially complex surfaces on CNC machines by controlling the roughness formation process: specialty 05.02.08 – Mechanical Engineering Technology: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences (Eng.) / Dmitry Aleksandrovich Malyshkin. Barnaul, 2003. 15 p.

3. Vasilkov D.V., Aleksandrov A.S., Golikova V.V. Self-oscillations during cutting. *Systems analysis and analytics.* 2018; 3(8):14-24. EDN YNNEGD.

4. Molchanov A.A. Increasing the information efficiency of vibration studies of metal-cutting machines based on the modal analysis of non-stationary oscillatory processes: specialty 05.02.07 – Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Molchanov Aleksandr Aleksandrovich. 2020. 175 p. EDN JZWNDY.

5. Kolyadin A.V. Stability of motion of the machine tool technological system during step milling of hard-to-machine materials: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. L.: LPI; 1982. 266 p.

6. Larkin E.V., Gorshkov A.A. Stability assessment of multi-loop control systems using the Routh-Hurwitz criterion. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences.* 2022; 9:3-8. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-3-8. EDN ITQFHH.

7. Volovich G.I. Circuitry of analog and analog-digital electronic devices: a practical guide. 4th ed., revised. and enlarged. Moscow: DMK Press; 2018. 626 p.

8. Tietze U., Schenk K. Semiconductor Circuit Design. Volume II: A Practical Handbook. Trans. from German by Karabasheva G.S. 13th ed. Moscow: DMK Press; 2023. 943 p. Text: electronic.

9. Linear Circuits: A Design Guide [Text]. Ed. orig. ed. Henk Zumbalen; trans. from English by Sultanov V.O., edited by Vlasenko A.A. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 1127 p.

10. Data Sheet AD7788/AD7789. Text: electronic // chipdip.ru: [website]. URL: https://static.chipdip.ru/lib/981/DOC037981818.pdf (date accessed: 21.04.2026). Access mode: free.

11. Digital Accelerometer ADXL345. Text: electronic // chipdip.ru: [site]. URL: https://static.chipdip.ru/lib/362/DOC004362403.pdf (date accessed: 21.04.2026). Access mode: free.

12. Microcircuit of 32-bit single-crystal microcomputer with flash memory of the K1986BE92QI type. Text: electronic // chipdip.ru: [site]. URL: https://ic.milandr.ru/upload/iblock/9b1/8sye6gudsluy9r733y9d17afeh k4qf3q/%D0%9A1986%D0%92%D0%9592QI.pdf (Accessed: 21.04.2026). Access mode: free.

13. Debug board LDM-BB-K1986BE92QI. Text: electronic // LDM Systems: [website]. URL: https://ldm-systems.ru/product/21201 (Accessed: 21.04.2026). Access mode: free.

14. Zadorin A.I., Zadorin N.A. Lagrange interpolation and Newton–Cotes formulas on a Bakhvalov mesh in the presence of a boundary layer. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2022; 62(3):355-366. DOI: 10.31857/S0044466922030140. EDN GSRURP.

15. Skuratov D.L., Burmistrov E.V., Samykin V.N. Improving the vibration resistance of technological systems during the processing of aircraft engines. *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev.* 2009; 3-1(19):200-206. EDN LADUHN.

16. Beloborodov S.M. Methodology for Ensuring Dynamic Stability of Shaft Lines of High-Speed Gas Turbine Units Based on Adaptive Rotor Assembly: specialty 05.02.08 – Mechanical Engineering Technology: abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Beloborodov Sergey Mikhailovich. Rybinsk, 2011. 32 p. EDN QHMSKL.

17. Wierzbicki S. Visualization of Vibrations in Structural Diagnoses of Technical Objects. *Vibrations in Physical Systems.* 2019; 30. Art. 2019205.

18. Dio W.A., Kasai H., Okiji A. Dynamical Phenomena Including Many Body Effects at Metal Surfaces. *Surface Science.* 2002; 500(1-3):105-126.

DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01568-0. EDN YKNBGW.

19. Al Dushaishi M.F., Stutts D.S. Vibration analysis of simultaneous drilling and reaming BHA. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.* 2020; 10(8):3409-3417. DOI: 10.1007/s13202-020-00977-3. EDN AKXWBJ.

20. Orsingher E., D'ovidio M. Vibrations and Fractional Vibrations of Rods, Plates and Fresnel Pseudo-Processes. *Journal of Statistical Physics.* 2011; 145(1):143-174. DOI: 10.1007/s10955-011-0309-5. EDN YWLZWZ.

21. Guo Jiang, Li Qikai, Qin Pu, Ankang Yuan, Lu Mingyang, Ke Xiaolong, Yicha Zhang, Cheung Benny. Internal surface finishing and roughness measurement: A critical review. *Chinese Journal of Aeronautics.* 2024; 38. DOI: 10.1016/j.cja.2024.11.013.

22. Bao-feng, Si-yuan, Cui-e, Bing-xian, Zhao-yao. Review of measurement methods for areal surface roughness. *Optics and Precision Engineering.* 2019; 27:78-93. DOI: 10.3788/OPE.20192701.0078.

23. Xu Cun. Application Research of MEMS ADXL345. *Advanced Materials Research.* 2012; 457-458:1550-1553. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.1550.

24. Teng Yuntian, Zhang Bingbing, Qiu Zhongchao, Hu Xingxing, He Zhaobo. High-sensitivity dual-FBG acceleration sensor for low frequency vibration measurement. *Journal of Optics.* 2023; 53:2361-2373. DOI: 10.1007/s12596-023-01477-3.

25. Xie Jinxuan, Zhou Tong, Li Xiaoshi, Chen Yu, Yang Tianyu, Su Yan. A MEMS-Based Three-Ring Capacitive Angular Position Sensor With an Absolute Zero Position Feature. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2024; 72(1):1-11. DOI: 10.1109/TIE.2024.3409884.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Dmitry A. Malyshkin, Associate Professor, Department of Information Technology, Mechanical Engineering, and Motor Transport, Prokopyevsk Branch of the , T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Nogradskaya St., 19a, PhD, Associate Professor, e-mail: dmitry01022007@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1490-4890

Maksim A. Inozemtsev, Senior Lecturer, Department of Information Technology, Mechanical Engineering, and Motor Transport, Prokopyevsk Branch of , T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Nogradskaya St., 19a, e-mail: inozemcevma@kuzstu.ru

Nikolay V. Ababkov, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Vesennaya St., 28, PhD in Engineering (Cand. of Sc.), Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0794-8040

Contribution of the authors:

Dmitry A. Malyshkin – scientific management, formulation of the research problem, conclusions, and writing.
Maksim A. Inozemtsev – data collection and analysis, experimental studies, conclusions, and writing
Nikolay V. Ababkov – review of relevant literature, processing of results, and writing.

All authors have read and approved the final manuscript.