

Г.А. ОБОРСКИЙ, Ю.Г. ПАЛЕННЫЙ, АНДР. А. ОРГИЯН  
Одесский национальный политехнический университет, Украина

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ИХ ИЗМЕРЕНИЯ НА ВРАЩАЮЩИХСЯ КОНСОЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

*В данной статье рассмотрены вопросы исследования крутильно-изгибных колебаний инструмента. Установлена связь между крутильными и изгибными колебаниями. Определены направления в исследованиях взаимодействия крутильных и изгибных колебаний. Описаны уравнения движения, описывающие изгибно-крутильные колебания технологической системы. Определены задачи разработки измерительного устройства для измерения крутильно-изгибных колебаний. Приведены известные способы измерения крутильных колебаний. Поставлены задачи, решение которых позволит проводить измерения крутильно-изгибных колебаний. Предложена схема устройства измерения крутильно-изгибных колебаний с бесконтактной передачей измерительной информации для визуализации и анализа.*

*Ключевые слова:* крутильно-изгибные колебания, тензометрирование, бесконтактные измерения, вибрации.

G.A. OBORSKY, YU.H. PALENNYI, ANDR. A. ORGIYAN  
Odessa National Polytechnic University, Ukraine

### MAGNETIC NON-CONTACT SENSORS FOR MEASUREMENT OF VIBRO

*The problems of the study of torsional-bending vibrations of the instrument. The relationship between the torsional and bending vibrations. The directions in the study of interaction of torsional and bending vibrations. Describe the equations of motion that describe the torsional-bending vibrations of the technological system. Defined task of developing a measuring device for measuring the torsional-bending vibrations. Shows known methods for measuring torsional vibration. The tasks, the solution of which will allow to measure the torsional-bending vibrations. A diagram of the device measuring the torsional-bending vibrations with non-contact transmission of measurement data for visualization and analysis.*

*Keywords:* torsional-bending vibrations, strain measurement, non-contact measurement of vibration.

В задачах технологической динамики совместные изгибно-крутильные колебания инструмента часто являются предметом исследования, например при комплексной обработке поршней, при растачивании прерывистой поверхности, при изучении технологических возможностей крутильно-податливых борштанг, при изучении виброустойчивости широколезвийных конических разверток одностороннего резания и т.п. [1, 2]. Установлено существенное влияние элементов упруго-диссипативной инерционной системы (УДИС), в частности шпиндельного узла, на изгибные и крутильные колебания. Параметры крутильных колебаний зависят от изменения характеристик системы при варьировании скорости резания, а так же вылета резца.

Исследования колебаний консольных борштанг отделочно-расточных станков (ОРС) показали, что пространственная форма изгибных колебаний борштанги практически совпадает с формой статического изгиба при нагружении радиальной силой у резца. Установлено, что связь между изгибными и крутильными колебаниями является слабой, а амплитуды перемещений вершины резца при изгибных колебаниях борштанги примерно на порядок больше, чем при крутильных. С увеличением диаметра борштанги отношение этих амплитуд так же увеличивается. Длина борштанги и глубина резания в большей степени влияют на уровень колебаний, чем скорость резания и подача, изменяемые в рекомендуемых пределах [3].

Весьма информативны исследования «длинных» борштанг, для которых отношение  $l/d > 3$ ; при этом УДИС можно считать одномерной, а замкнутая динамическая система в зависимости от условий обработки либо обладает запасом устойчивости, либо переходит в режим автоколебаний. Исследования колебаний борштанг позволяет установить предельные условия обработки без применения специальных виброгасящих устройств.

Возможность возбуждения нарастающих изгибно-крутильных колебаний в соответствии с теорией координатной связи [4] реализуется лишь в случае близости значений собственных частот изгибных и крутильных колебаний борштанг, а так же при «внутреннем резонансе». Однако эти взаимодействия не объясняют причин возбуждения интенсивных изгибно-крутильных колебаний при значительном различии собственных частот, что часто наблюдается на практике.

При изучении взаимодействия изгибных и крутильных колебаний следует различать две формы последних: высокочастотные упругие крутильные колебания борштанги и низкочастотные угловые колебания, вызванные упругими и неупругими перемещениями в приводе главного движения станков.

Особенности взаимодействия изгибных и крутильных колебаний поясняются расчетным анализом свойств динамической системы. Уравнения движения, описывающие изгибно-крутильные колебания технологической системы, представляют замкнутую динамическую модель технологической системы и процесса резания.

$$m\ddot{x} + z_u \dot{x} + c_u y = (\cos j_u + \sin j_u) P_z,$$

$$I\ddot{\phi} + z_\phi \dot{\phi} + c_\phi \phi = R P_z,$$

$$T_p \ddot{\varphi} + P_z = -K_p \sin j_u + K_s \dot{\varphi} + K_s R j \dot{\varphi}$$

где  $m$ ,  $z_{\text{ш}}$ ,  $c_u$  – приведенные значения массы, коэффициента демпфирования и жесткости упругой системы;

$I$ ,  $z_{\varphi}$  и  $c_{\varphi}$  – приведенные значения момента инерции, коэффициента демпфирования и крутильной жесткости упругой системы;

$y$  и  $\varphi$  – изгибная и крутильная амплитуды колебаний;

$P_z$  – главная составляющая силы резания;

$T_p$  – инерционная постоянная стружкообразования;

$K_p$  – коэффициент резания;

$K_s$  – скоростной коэффициент резания;

$\varphi_y$  – угол, проектирующий направление колебаний на направление главного движения;

$R$  – радиус обрабатываемой поверхности.

Решение этой системы уравнений позволяет изучить временную форму колебаний, рассчитать их параметры и получить информацию о взаимодействии этих двух форм. Эти расчеты должны соответствовать экспериментальным результатам, что привело к необходимости постановки и решения ряда задач, связанных с измерением изгибных и крутильных колебаний вращающихся инструментов, в частности консольных борштанг.

Основная сложность измерения крутильных колебаний связана с тем, что объект измерений (борштанга) как правило, вращается и перед исследователями стоит задача съема измерительной информации с вращающегося объекта (инструмента или детали).

Традиционно для измерения крутильных колебаний используют два способа – применение торсиографов и измерение амплитуд скручивания и изгибов с помощью тензодатчиков, наклеиваемых на вал.

Торсиографы (обычно механические, оптические или электрические) – устройства, принцип работы которых заключается в том, что одна часть торсиографа закреплена неподвижно на вращающемся валу, а вторая часть – (маховик) соединена с вращающимся валом через упругую связь [5]. При равномерном вращении вала взаимное перемещение маховика и вала равны нулю. Крутильные колебания вала приводят к тому, что маховик либо «отстаёт», либо «опережает» деталь, что и служит источником измерительной информации. Такие устройства называют торсиографами сейсмического принципа действия.

В настоящее время применяют торсиографы, у которых измерительный сигнал получают от электронных первичных преобразователей, таких как емкостные или индуктивные датчики. Применение индуктивных и емкостных первичных преобразователей не исключило необходимости установки маховика торсиона на вращающийся вал. Кроме того, в таких измерительных устройствах возникает задача передачи измерительной информации с вращающегося торсиографа на устройство сбора и обработки измерительной информации.

Измерение крутильных колебаний с помощью торсиографов имеет ряд недостатков. Во-первых, из-за применения сейсмического принципа получения измерительной информации торсиографом сложно измерить крутильные колебания низких частот. Во-вторых, в связи с необходимостью использования маховиков, торсиограф имеет достаточно большие размеры. Таким образом, торсиографы нашли широкое применение для измерения крутильных колебаний электрических двигателей или двигателей внутреннего сгорания.

При исследовании процессов растачивания с использованием борштанг, нецелесообразно использовать торсиографы по причине их относительно больших размеров. Кроме того, установка торсиографа существенно влияет на физические характеристики объекта измерений.

Измерение крутильных деформаций с помощью тензодатчиков существенно упрощает задачу размещения на вращающемся валу чувствительных элементов. Размеры и масса тензодатчиков настолько малы, что они не оказывают влияния на измеряемый объект, однако, применение тензодатчиков не упрощает задачу съема измерительной информации с вращающейся детали или борштанги.

В первых опытах тензометрирования крутильных колебаний применялись ртутные токосъемники для передачи измерительного сигнала с вращающегося вала на тензоусилитель. С развитием электронной базы исследователи использовали индукционные и оптические способы передачи измерительной информации с вращающегося вала. В настоящее время достаточно широко используют бесконтактную передачу измерительного сигнала радиосигналом, в том числе с использованием цифровой техники.

На сегодняшний день электронная база позволяет решать такие задачи:

- подача питания для первичных устройств съема измерительной информации (тензомоста) и других электронных устройств;
- предварительное усиление сигнала непосредственно на вращающемся валу;
- передача усиленного сигнала на регистрирующее устройство в аналоговом виде или после оцифровывания.

Серийно выпускаемые бесконтактные датчики крутящего момента изготавливаются в виде шлицевых валов или фланцев, на которые устанавливается первичный преобразователь с устройством первичной обработки измерительного сигнала (рисунок 1).

Применение серийно изготавливаемых датчиков для измерения крутильных колебаний вращающихся борштанг ограничено необходимостью установки датчиков на станок, что не всегда выполнимо. Наилучшим способом решения поставленной задачи является крепление тензодатчиков непосредственно на борштанге, а передачу измерительного сигнала на устройство сбора и обработки измерительной информации осуществлять бесконтактным способом.

Для реализации этой задачи изготовлено устройство для бесконтактного измерения крутильных колебаний, в состав которого входят:

- 1) три блока тензодатчиков собранных по полно-мостовой схеме;
- 2) три нормирующих двухкаскадных усилителя;
- 3) три независимых 12-ти разрядных аналогово-цифровых преобразователя (АЦП);
- 4) микроконтроллер;
- 5) устройство беспроводной передачи данных, Bluetooth;
- 6) накопитель информации – Flash-память;
- 7) устройство автономного питания измерительного устройства;
- 8) компьютер для сбора и обработки информации.

Элементы 1...7 крепятся на борштанге и на ее фланце. Управление микроконтроллером производится через радиоканал. Схема измерительного устройства приведена на рисунке 2.



Рис. 1. Серийно изготавливаемые измерители крутящих моментов с беспроводной системой передачи измерительного сигнала

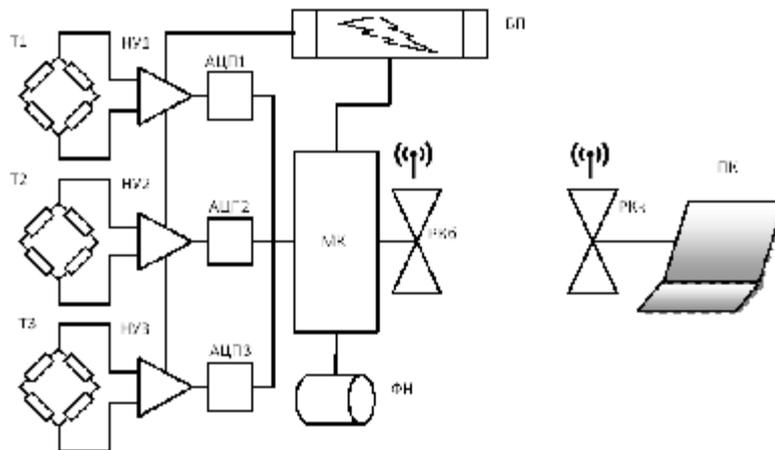


Рис. 2. Блок-схема измерительного устройства:

T1, T2, T3 – тензомосты; НУ1, НУ2, НУ3 – нормирующие усилители; АЦП1, АЦП2, АЦП3 – аналогово-цифровые преобразователи; МК – микроконтроллер; ФН – флеш-накопитель; БП – блок питания устройства; РКб и РКк – устройства радиоканала; ПК – персональный компьютер

В измерительном устройстве используют три независимых канала формирования первичной измерительной информации, которая может быть использована для получения информации об изгибных деформациях в двух плоскостях и крутильных колебаниях борштанги. В независимые каналы входят: три тензорезисторных моста, три двухкаскадных усилителя и три АЦП.

Применение полных мостов с тензодатчиками позволяет измерить и изгибные, и крутильные колебания с высокой чувствительностью и линейностью характеристик, а так же позволяет уменьшить влияние температуры на выходной сигнал.

Нормирующие усилители усиливают сигнал с тензомостов в нормированный аналоговый сигнал по напряжению. Выходной сигнал с нормирующих усилителей меньше диапазона входных значений АЦП для защиты измерительной информации от потери в случае поступления пиковых значений с первичных преобразователей.

Три независимых 12-битных АЦП преобразуют аналоговый сигнал в числовой код с периодом снятия сигнала 0,1 мс, что соответствует частоте опроса 10 кГц каждого датчика.

После оцифровывания измерительная информация обрабатывается микроконтроллером и может либо передаваться на персональный компьютер для оперативного управления процессом измерений, либо записываться на флеш-накопитель.

После обработки оцифрованного сигнала основную сложность представляет задача передачи и сохранения этого сигнала. Простые устройства приема-передачи информации не обеспечивают достаточной скорости передачи измерительной информации. В аналогичных устройствах, предназначенных для измерения момента на валах двигателей описанных в [6], измерительная информация передается с вращающегося вала с частотой не более 500 SPs. Частота получения измерительной информации, в описанном устройстве ограничивалась скоростью преобразования аналогового сигнала в цифровой код.

Для получения достоверной информации при изучении изгибных и крутильных колебаний необходимо производить измерения с частотой 5...6 kSPs [6].

Для реализации поставленной задачи был использован микроконтроллер STM32F407VGT6 с ядром Cortex-M4F более высокой производительности по сравнению с аналогами, снабженный тремя встроенными 12-битными АЦП со скоростью выборки до 2,4 MSPs. Таким образом, скорость работы устройства ограничивается не скоростью работы АЦП, а скоростью передачи или сохранения данных измерений.

В разработанном устройстве используется два режима обработки оцифрованных данных. В первом режиме данные измерений после считывания сразу же передаются на компьютер через беспроводное устройство связи Bluetooth со скоростью 115200 bps, что приблизительно равно 10 kVps. С учетом трех каналов и служебной информации при такой скорости передачи полезный сигнал может быть передан со скоростью 1,25 kVps на каждый из трех каналов.

Такая скорость несколько превышает скорость работы аналогичных устройств [6], но позволяет в режиме реального времени анализировать поступающую с устройства информацию и управлять процессом измерений.

Для получения данных измерений на более высоких скоростях, по радиоканалу на измерительное устройство через беспроводное устройство связи Bluetooth передается сигнал начала сбора и записи измерительной информации.

После получения сигнала микроконтроллер STM32F407VGT6 сохраняет всю измерительную информацию в буфере памяти по 16 kB и, после заполнения буфера, блоками сохраняет ее на флеш-накопителе.

Измерительная информация записывается в буфер с частотой 10 kSPs. Таким образом, при частоте вращения шпинделя  $1600 \text{ мин}^{-1}$ , в одном блоке будет содержаться непрерывная измерительная информация, полученная в течение 5-и полных оборотов шпинделя. Емкость флеш-накопителя позволяет записывать измерительную информацию в течение нескольких часов работы измерительного устройства.

Для питания устройства используется внешний аккумулятор емкостью 2400 мА·ч, достаточный для непрерывной работы устройства в автономном режиме на вращающейся борштанге в течение не менее 10 часов.

#### Литература

1. Оргиян А.А. Комплексная обработка поршней ДВС: колебания и точность / А.А. Оргиян // Високі технології в машинобудуванні : зб. наукових праць НТУ «ХПІ». – 2001 – Вип. 1(4). – С. 198–204.
2. Оборский Г.А. Математическая модель динамической системы процесса резания однолезвийной разверткой одностороннего резания / Г.А. Оборский, А.А. Оргиян, А.М. Голобородько, Л.М. Перпери // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014 – Вып. 84. – С. 175 – 185.
3. Оргиян А.А. Особенности колебаний консольных борштанг для тонкого растачивания / Оргиян А.А., Баланюк А.В. // Технології, матеріали, транспорт і логістика. – б.м. : Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, 2014. – С. 157–168.
4. Копелев Ю.Ф. Параметрические колебания металлорежущих станков / Ю.Ф. Копелев, А.А. Оргиян, В.М. Кобелев // Печатний двор. – ОНПУ. – 2007. – 352 с.
5. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам / Крайнев А.Ф. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 560 с.
6. Гуринов А.С. Измерение крутящего момента на вращающихся валах / А.С. Гуринов, В.В. Дудник, В.Л. Гапонов, В.В. Калашников // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. – 2012. – № 2.

Рецензія/Peer review : 18.1.2016 р.

Надрукована/Printed : 15.2.2016 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією