

Измерение амплитуды вибраций в технологических системах

В статье рассмотрены контактные и бесконтактные методы измерения амплитуды вибраций ультразвукового диапазона частот, которые могут быть использованы для настройки в резонансный режим ультразвукового технологического оснащения пайки, микросварки и очистки.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Игорь Петухов

petuchov@kbtcm.by

Введение

В процессе эксплуатации большинство изделий подвергается воздействию механических вибраций, частота которых находится в диапазоне от 1–2 до 2000 Гц. Электрические, электронные и механические компоненты бортовых систем управления космическими объектами, сверхзвуковыми самолетами и ракетами должны выдерживать механические вибрации частотой от 10 Гц до 20 кГц. При этом наиболее опасны ситуации, когда частота внешних вибраций совпадает с собственной резонансной частотой компонентов, что может привести их к выходу из строя [1].

При эксплуатации ультразвуковой (УЗ) технологической аппаратуры необходим систематический контроль амплитуды вибраций в специальном технологическом оснащении: ваннах, паяльниках, пистолетах, излучателях и др. [2]. Эффективность УЗ-обработки (сварки, пайки, размерной обработки и т. д.) в производстве изделий электроники во многом зависит от точности и достоверности контроля амплитуды вибраций УЗ технологического оснащения [3, 4]. Для измерения амплитуды УЗ-колебаний применяют оптические микроскопы, однако этот способ, отличаясь простотой реализации, обладает невысокой точностью и относительно большой трудоемкостью. Кроме того, на его основе невозможно создать систему активной стабилизации амплитуды в ходе технологического процесса. Ранее выпускаемые промышленностью приборы типа УБВ-2 [5], в которых использовались индуктивные датчики, непригодны для измерения амплитуды непосредственно в ходе технологического процесса обработки.

Для измерения такими датчиками требуется наличие достаточно большой свободной площадки на контролируемой поверхности диаметром не менее 6 мм.

Таким образом, непрерывный и достоверный контроль амплитуды вибраций является неотъемлемой составляющей процессов производства и эксплуатации изделий различного назначения.

Методы измерения амплитуды ультразвуковых колебаний

Для контроля амплитуды вибраций и настройки в резонансный режим УЗ технологического оснащения применяют контактные и бесконтактные измерители, выполненные на основе пьезоэлектрических, оптических, индуктивных и емкостных датчиков. Простым средством контроля вибраций служит виброметр контактного типа, конструктивно состоящий из переносного блока измерений амплитуды УЗ-колебаний и выносного датчика вибраций в виде акустического щупа. В основу работы виброметра положен принцип регистрации амплитуды электрического сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим преобразователем, измерительным стрелочным прибором [6] (рис. 1а).

Датчик вибраций включает пьезоэлектрический преобразователь, металлический волновод, демпфер и корпус из изоляционного материала. Во внутренней полости корпуса на расстоянии, равном $\lambda/4$ от нерабочего торца волновода, где λ — длина УЗ-волны, закреплен пьезокерамический преобразователь. В состав прибора входит выпрямительная схема и измерительный прибор магнитоэлектрического типа с большим внутренним сопротивлением. Данная схема применима при значительной амплитуде сигнала с пьезодатчика, составляющей единицы вольт. При меньших амплитудах вибраций (менее 10 мкм) необходимо усиление сигнала с пьезодатчика. Электрическое напряжение с обкладок пьезоэлемента 1 по высокочастотному кабелю подается на вход усилителя 2 с коэффициентом усиления от 10 до 100 раз (рис. 1б).

Чувствительность такого датчика составляет 1–1,5 мкм при усилии нагружения щупа 1–2 Н. Для более точной настройки оборудования необходимо контролировать сигнал с пьезодатчика в определен-

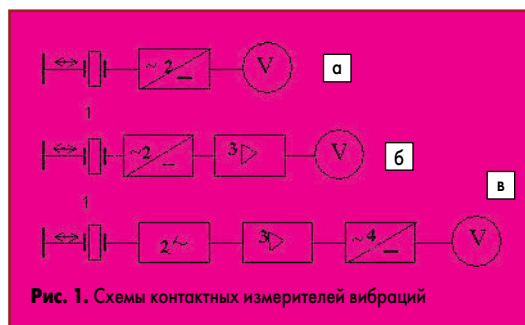


Рис. 1. Схемы контактных измерителей вибраций

ной полосе частот, в которой работает УЗ технологическое оснащение. С этой целью в схему включают полосовой фильтр 4 (рис. 1в). Внешний вид контактного измерителя вибраций приведен на рис. 2.

Контактные измерители вибраций используют для настройки в резонансный режим работы ультразвуковых паяльников типа УЗП2-0,025, ванн очистки УЗВ-0,4, ванн лужения УЗВЛ-0,4, установок микросварки типа УЗП-02 М, ЭМ-4020, диагностирования магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей ультразвука. Однако такие приборы позволяют осуществлять лишь периодический контроль амплитуды колебаний УЗ-инструментов в процессе выполнения технологических операций, что затрудняет точную настройку УЗ технологического оборудования, часто приводит к выполнению технологической операции при неоптимальных режимах и увеличивает процент дефектных изделий. Недостатком контактного метода измерения вибраций является невозможность контроля амплитуды непосредственно в ходе процесса ультразвуковой обработки, а также зависимость показаний прибора от усилия нагружения щупа датчика.

Для непрерывного контроля вибраций и настройки инструмента на резонанс применяют встроенный пьезоэлектрический датчик, закрепленный в двух точках на магнитострикционном преобразователе УЗ-инструмента. Первая точка закрепления располагается в нулевой плоскости колебаний, а вторая соответствует максимальным вибрациям. В результате одна поверхность пьезоэлектрического датчика является статичной, в то время как на ее вторую воздействуют колебания максимальной величины, что обеспечивает амплитуду выходного сигнала до 1 В. Сигнал датчика усиливается, детектируется и измеряется прибором с высоким внутренним электрическим сопротивлением.

Для повышения точности измерения, уменьшения чувствительности к внешним воздействиям и улучшения удобства эксплуатации разработан портативный цифровой измеритель вибраций (рис. 3), который состоит из пьезодатчика, резистивного делителя напряжения, калибратора (G_{\approx}), высокочастотного детектора, электронного коммутатора, источника опорного напряжения (G_{-}), счетчика (PC), генератора тактовых импульсов (G_{\square}) и индикатора (HG), причем коммутатор соединен с источником опорного напряжения и интегратором, а тактовый генератор через калибратор соединен с делителем [7].

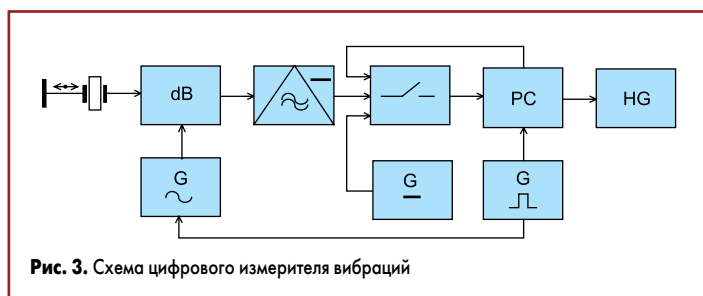


Рис. 3. Схема цифрового измерителя вибраций

Пьезодатчик конструктивно выполнен в виде выносного элемента. Резистивный делитель снижает уровень принимаемого сигнала при больших вибрациях и имеет два коэффициента деления — 1:10 и 1:100. Высокочастотный детектор позволяет получить на выходе постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде измеряемого электрического сигнала, поступающего от пьезоэлектрического преобразователя. Электронный коммутатор в виде электронных ключей, собранных на МОП-транзисторах, служит для периодической подачи на интегратор входного сигнала и опорного напряжения. Счетчик содержит интегрирующую цепь, схему сравнения, АЦП и служит для формирования и подсчета числа тактовых импульсов, укладываемых в течение разрядки интегрирующего конденсатора. Тактовый генератор формирует сигнал частотой 50 кГц $\pm 1\%$, которая является средней частотой измеряемого диапазона вибраций. Калибратор вырабатывает опорный сигнал заданной амплитуды и частоты для подачи его на делитель при калибровке прибора.

Цикл измерения и преобразования входного сигнала предусматривает три этапа. В течение первого этапа, который длится 4000 периодов тактовой частоты, входной сигнал через коммутатор поступает на интегратор. Напряжение на выходе интегратора изменяется с постоянной скоростью, пропорциональной входному сигналу. В конце первого этапа с помощью схемы сравнения определяется знак входного напря-



Рис. 2. Контактный измеритель вибраций

жения по знаку напряжения на выходе интегратора. Чувствительность схемы сравнения такова, что полярность входного сигнала определяется даже тогда, когда он составляет долю единицы отсчета. К интегратору и схеме сравнения подключены конденсаторы — интегрирующий и коррекции нуля.

На втором этапе к интегратору подключается источник опорного напряжения так, что интегрирующий конденсатор разряжается полностью — напряжение на выходе интегратора становится равным нулю. Время разрядки интегрирующего конденсатора, выраженное числом периодов тактовых импульсов, и есть результат измерения, записанный в счетчик. При помощи дешифратора состояние счетчика преобразуется в сигнал сегментного кода и поступает на индикаторы.

Третий этап начинается с прекращения работы счетчика. Логическое устройство переключает коммутатор так, что образуется следящая система «индикатор — схема сравнения». В результате погрешность измерения из-за смещения нуля и его температурного дрейфа не превышает 1 мкм. Цифровой прибор представляет собой конструктивно законченное изделие с габаритными размерами 180×100×50 мм, весом не более 0,5 кг и напряжением питания 6 В, что позволяет оператору переносить и удерживать его в одной руке.

Бесконтактные методы измерений подразделяются на оптические, магнитоэлектрические и емкостные. Наибольшей чувствительностью обладают емкостные датчики, чей принцип работы основан на измерении емкости переменного зазора между поверхностью волновода и измерительной поверхностью датчика. Создан бесконтактный виброметр [8], в котором изменение емкости переменного зазора под действием УЗ-колебаний инструмента преобразуется в частотно-модулированный сигнал, который обрабатывается с помощью электронной схемы и регистрируется измерительным прибором. Бесконтактный виброметр включает выносной вибродатчик и измерительное устройство. В состав вибродатчика входят ВЧ-генератор 1, конструктивная емкость C_K ; в состав измерительного устройства — усилитель-ограничитель 2, демодулятор 3, предварительный усилитель НЧ-сигналов 4, аттенуатор 5, усилитель полосовой 6, детектор сигнала 7, измерительная головка (рис. 4).

Модуляция ВЧ-генератора осуществляется с помощью конструктивной емкости C_K . При вибрации рабочего инструмента происходит изменение зазора между пластиной датчика и плоскостью торца волновода, что, в свою очередь, приводит к изменению частоты генератора, то есть к его модуляции (рис. 5). Девиация частоты генератора прямо пропорциональна амплитуде колебаний рабочего инструмента. Вибродатчик прибора соединяется с измерительным устройством высокочастотным экранированным кабелем, по которому подается и напряжение питания. Электрический сигнал с вибродатчика в приборе демодулируется с частотой, равной частоте колебаний, и подается на усилитель, обеспечивающий усиление сигналов в диапазоне частот 16,5–66 кГц. На выходе детектора включена измерительная головка, осуществляющая индикацию измеренного значения амплитуды. При измерениях прибор устанавливается на неподвижное основание вбли-

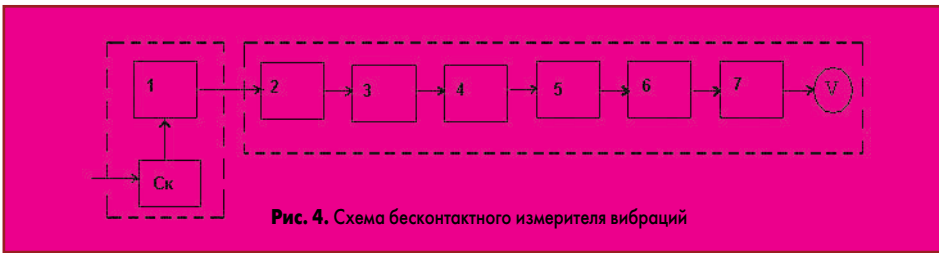


Рис. 4. Схема бесконтактного измерителя вибраций

зи рабочего инструмента УЗ-установки, а его воспринимающий датчик — вблизи торца УЗ-инструмента.

Бесконтактные измерители вибраций обладают более высокой чувствительностью, и их показания в меньшей степени зависят от оператора. Недостатками таких измерителей являются необходимость стационарного закрепления датчика емкостного типа на инструменте, чувствительность к внешним вибрациям и электромагнитным полям (рис. 6).

Анализ передаточных характеристик емкостных датчиков показывает, что наибольшей чувствительностью к малым перемещениям и вибрациям обладают датчики, действие которых основано на изменении зазора между датчиком и объектом. Для таких датчиков величина реактивного сопротивления прямо пропорциональна величине зазора, а передаточная характеристика прибора — линейная. Однако из-за высокого входного сопротивления таких преобразователей приборы данного типа обладают высокой чувствительностью к электромагнитным наводкам. Это обстоятельство сдерживает широкое применение емкостных датчиков для контроля колебаний УЗ-преобразователей.

Наиболее устойчивым к электромагнитным наводкам является измерительный преобразователь с частотной модуляцией несущего высокочастотного сигнала. В этом случае емкостный датчик подключается к колебательному контуру высокочастотного автогенератора и управляет его частотой. Причем датчик оказывается зашунтированным индуктивностью колебательного контура, обладающей малым реактивным сопротивлением для низкочастотных помех. Данное обстоятельство обеспечивает малую чувствительность к электромагнитным наводкам. Кроме того, последующие резонансные цепи и частотное детектирование практически полностью устраняют возможные помехи.

Выходное напряжение частотного детектора U обратно пропорционально величине зазора между датчиком и контролируемой поверхностью d :

$$U \sim (\epsilon \times S) / C_0 d, \quad (1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, S — площадь датчика, C_0 — емкость датчика.

Если амплитуда измеряемых колебаний мала по сравнению с величиной зазора, то нелинейностью передаточной характеристики можно пренебречь. При этом амплитуда переменного напряжения на выходе детектора U_a прямо пропорциональна амплитуде колебаний A [9]:

$$U_a \approx ((\epsilon \times S) / C_0 d^2) \times A. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что чувствительность прибора в большой степени зависит от величины зазора. Относительная погрешность измерения амплитуды:

$$\Delta U_a / U_a = -2 (\Delta d / d). \quad (3)$$

Поэтому для обеспечения высокой точности измерения амплитуды в виброметрах такого типа необходимо предусмотреть возможность контроля величины зазора по величине постоянного напряжения на выходе частотного детектора.

Измерение вибраций при настройке ультразвуковых систем микросварки

Уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах интегральных схем требует прецизионной работы ультразвуковых систем (УЗС) микросварки, поскольку подводимые электрические колебания от генератора пре-

образуются ультразвуковым преобразователем (УЗП) в механические колебания на частоте резонанса УЗП и должны без потерь передаваться в зону сварки проволочных выводов. Поэтому необходимо оптимальное согласование рабочего инструмента с УЗП, так как УЗП с инструментом представляет собой электро-механическую резонансную систему, параметры которой (частота и входной импеданс) в определенных пределах могут изменяться в процессе работы, например, при изменении статического усилия на УЗП. Поэтому для поддержания частоты резонанса все современные УЗ-генераторы содержат встроенную фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) и устройства компенсации изменения входного импеданса.

Очень важным моментом использования УЗ колебательной системы микросварки является корректная установка микроинструмента в зажиме — так называемый вылет инструмента (рис. 7). Необходимо, чтобы собственные частоты продольных колебаний УЗ-преобразователя и изгибных колебаний инструмента совпадали. В противном случае резонансная частота примет какое-то промежуточное значение и в месте сопряжения увеличится реакция нагрузки (за счет реактивных составляющих), что может вызвать нарушение согласования преобразователя с инструментом.

Лидером и монополистом на рынке подобных измерений является компания Polytec (Германия). Для исследования распределения



Рис. 7. Схема установки инструмента в волноводе:
 А — часть инструмента над волноводом;
 В — диаметр торца волновода;
 С — рабочий вылет инструмента

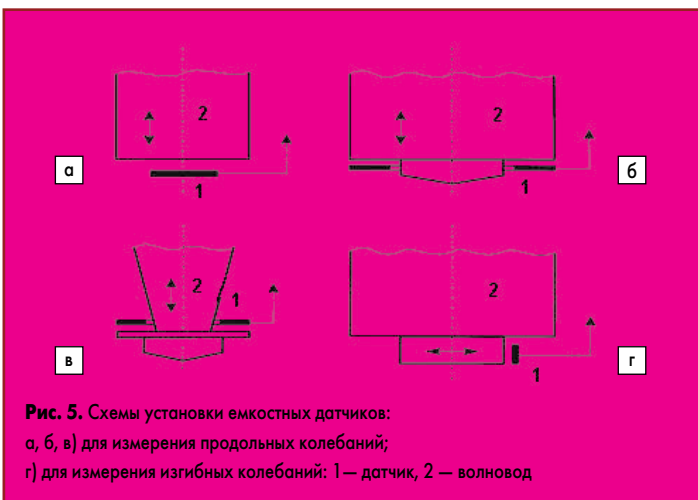


Рис. 5. Схемы установки емкостных датчиков:
 а, б, в) для измерения продольных колебаний;
 г) для измерения изгибных колебаний: 1 — датчик, 2 — волновод



Рис. 6. Внешний вид виброметра

амплитуды и частот колебаний вдоль УЗ технологической системы микросварки применен бесконтактный виброметр PSV-400 — наиболее передовое средство для бесконтактных измерений, визуализации и анализа колебаний различных конструкций.

Виброметр PSV-400 представляет четвертое поколение систем сканирующей виброметрии компании Polytec [10]. «Сердцем» является лазерный доплеровский виброметр — высокоточный оптический датчик для определения виброскорости и виброперемещения в заданной точке, принцип работы которого основан на интерференции отраженного луча лазера от движущейся поверхности с опорным лучом. В результате интерференции двух лучей изменяется интенсивность излучения, фиксируемого фотоприемником. Это дает возможность измерения частот от 0 Гц до 24 МГц и виброскорости от 0,02 мкм/с до 20 м/с.

В состав виброметра входят контроллер OFV-5000, оснащенный аналоговым и цифровым декодером скорости, измерительная головка, состоящая из сенсора виброметра PSV-I-400, высокоточного сканера и цветной видеокамеры с возможностью автофокусировки и 72-кратным увеличением и блок коммутации с кабелем длиной 10 м, персональный компьютер с операционной системой Windows XP и штатив с поворотной-наклонной переходником (рис. 8). При скорости сканирования до 30 точек/с диапазон сканирования составляет $\pm 20^\circ$ по осям X, Y; угловое разрешение $< 0,002^\circ$, угловая стабильность $< 0,01^\circ/\text{ч}$.

Динамические характеристики УЗП с резонансной частотой в диапазоне 60–70 кГц проверялись на сканирующей лазерной системе PSV-400 Polytec. Распределение амплитуды колебания вдоль сварочного инструмента, приведенное на рис. 9, показывает, что резонансная частота системы 66,2 кГц, а амплитуда колебаний инструмента составляет 0,25 мкм [11]. Данная модель позволяет измерять амплитуду колебания в диапазоне частот до 80 кГц, для более высокого диапазона используют другой контроллер. С помощью подобной системы не только определяют распределение колебаний вдоль оси инструмента, но и исследуют спектр колебаний.

Существует более простой метод для контроля колебаний на рабочем торце инструмента — прямое измерение колебаний, при этом инструмент находится между источником сфокусированного лазерного излучения и фотоприемником. Примером подобной системы является система ODS-10 F&K Physiktechnik



Рис. 8. Лазерный бесконтактный виброметр PVS-400

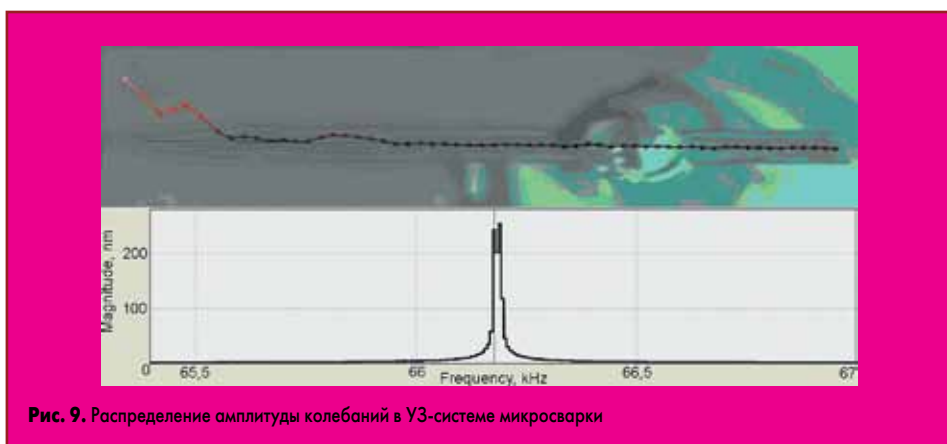


Рис. 9. Распределение амплитуды колебаний в УЗ-системе микросварки

(Германия) [12], принцип работы которой показан на рис. 10.

Для проведения экспериментальных исследований и проверки результатов моделирова-

ния распределения амплитуды УЗ-колебаний вдоль оси сварочного инструмента спроектирован и изготовлен стенд контроля СКК-01 (рис. 11), принцип действия которого основан

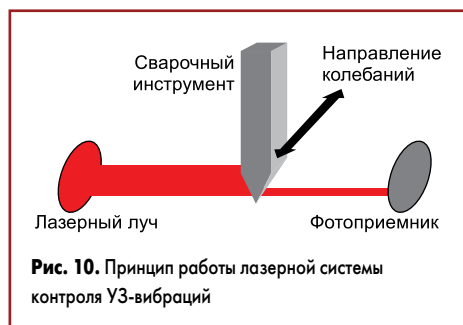


Рис. 10. Принцип работы лазерной системы контроля УЗ-вибраций

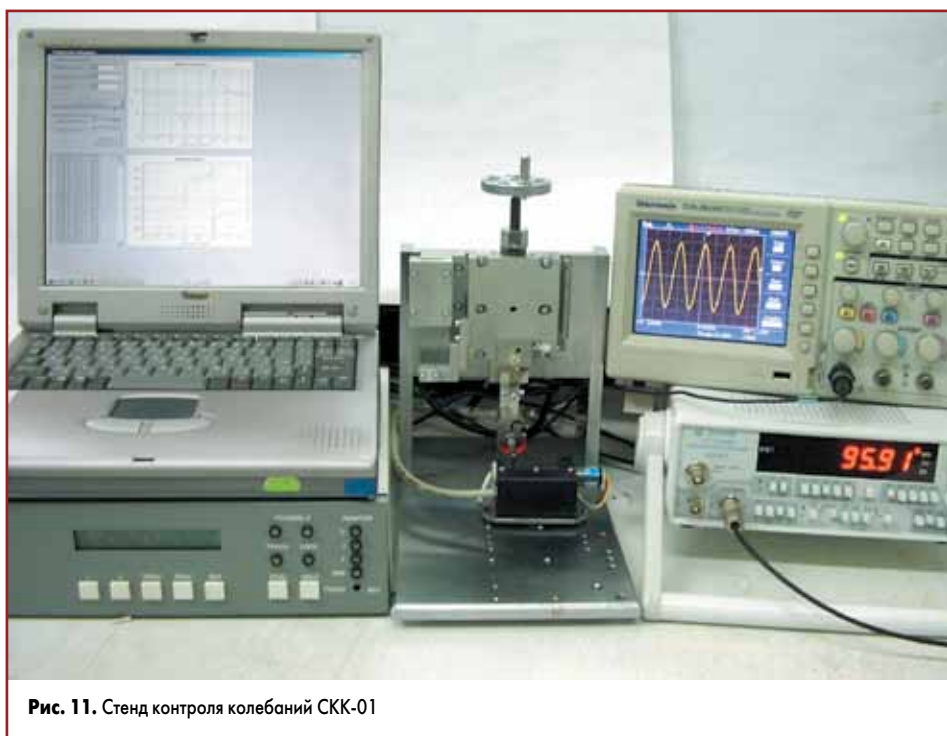


Рис. 11. Стенд контроля колебаний СКК-01

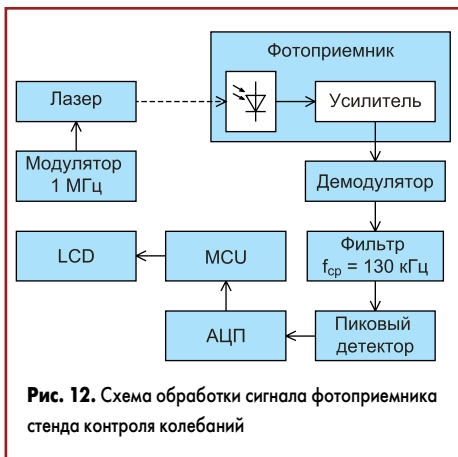


Рис. 12. Схема обработки сигнала фотоприемника стенда контроля колебаний

на контроле сигнала фотоприемника лазерного полупроводникового излучателя, чей луч наполовину перекрывается телом рабочего инструмента [13]. В отличие от сложных доплеровских интерферометров, измеряющих скорость колебаний и математически пересчитывающих их в амплитуду, для стенда применен метод прямого контроля амплитуды механических колебаний. Дополнительное преимущество метода — его нечувствительность к отражающим свойствам поверхности инструмента.

В рабочем режиме вибрация рабочего инструмента изменяет интенсивность лазерного луча, а фотоприемник регистрирует колебания УЗ-частоты. Поскольку амплитуда колебаний достаточно мала (0,1–1 мкм), то сигнал с фотоприемника также мал и требует усиления и фильтрации. Структурная схема обработки сигнала фотоприемника показана на рис. 12.

Лазерный луч модулируется на несущей частоте 1 МГц для исключения влияния внешней засветки и помех. Сфокусированный луч лазерного излучателя, попадая на рабочий инструмент, модулируется по амплитуде на УЗ-частоте колебаний рабочего инструмента. Сигнал колебаний инструмента с фотоприемника поступает на прецизионный демодулятор, который выделяет полезный сигнал УЗ-частоты и после фильтра низких частот с частотой среза 130 кГц поступает на пиковый детектор, выделяющий амплитудное значение. С помощью АЦП и микроконтроллера (MCU) пиковое значение амплитуды выводится на ЖК-дисплей (рис. 13). Синусоидальный

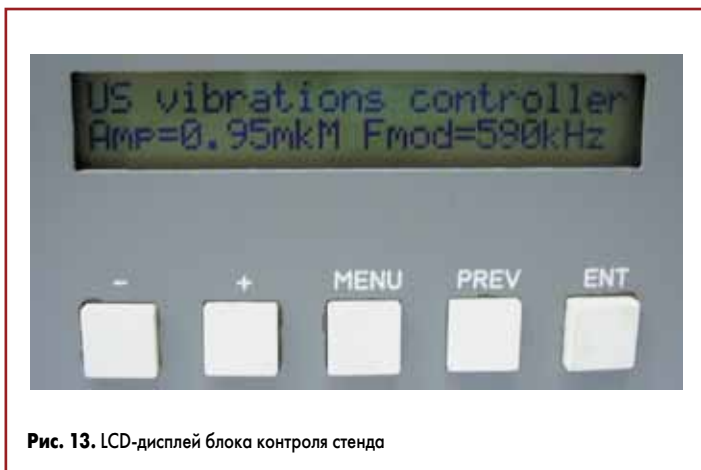


Рис. 13. LCD-дисплей блока контроля стенда

сигнал УЗ-колебаний после низкочастотного фильтра может быть выведен на осциллограф для наблюдения формы и амплитуды.

Положение УЗП с рабочим инструментом относительно луча регулируется микрометрическим винтом, приводящим в движение каретку с закрепленным УЗП, причем положение каретки и УЗП контролируется цифровым штангенциркулем. Таким образом, сдвигая инструмент относительно лазерного луча, можно контролировать распределение амплитуд колебаний вдоль оси инструмента.

Распределение амплитуды исследовалось на инструменте типа КУТ61-50-130-21 и УЗП с частотой резонанса 94 кГц. В инструменте на частоте резонанса 94 кГц возникает стоячая волна с четырьмя узловыми точками (рис. 14).

Как правило, алюминиевая проволока соединяет электроды полупроводниковых приборов, в том числе приборов силовой электроники, с соответствующими электродами подложки. Проволока соединяется с поверхностью электрода при помощи ультразвуковой микросварки. Из-за очень высоких требований, касающихся качества и надежности электрических соединений, необходим чрезвычайно точный контроль процесса. К тому же непрерывно увеличивающиеся скорости машин делают эти требования еще более строгими. Другой проблемой является разварка на сложных поверхностях, таких как узкие выводы разъемов, помещенные в пластмассовые рамки, разварка на мягких подложках, на выступающих кристаллах или плохо закрепленных выводных рамках.

В технологической системе микросварки УЗ-преобразователь создает энергию в форме механических вибраций и приводит в действие УЗ-систему в продольном собственном режиме вибраций, который из-за асимметричного размещения инструмента разварки, как правило, не совсем симметричен и имеет остаточные вибрации, перпендикулярные главному направлению разварки. Помимо собственного режима вибраций, существуют дополнительные ортогональные режимы вибраций, а также собственные режимы вибраций подложки или основания контактной площадки. В связи с нелинейной динамикой процесса это может привести к появлению продольных усилий при контакте и к нарушению процесса разварки.



Рис. 15. Силовые актюаторы, установленные на УЗ технологической системе

Для устранения ортогональных вибраций применены пьезоэлектрические актюаторы, установленные в верхней и нижней части УЗ-преобразователя (рис. 15) [14]. В свободной продольной вибрации электрические заряды на электродах в верхней и нижней части актюатора нейтрализуют друг друга. В изгибных вибрациях пьезоэлектрическая керамика «вытягивается», в то время как другая керамика «сжимается». В данном случае из-за противоположной поляризации используется полный пьезоэлектрический эффект.

Поэтому при приложении напряжения к актюаторам управления образуется чистый изгиб, или вертикальное перемещение корпуса преобразователя без формирования главной продольной вибрации. Таким способом достигается оптимальное сопряжение для ортогонального режима изгиба, в то время как сопряжение в продольном режиме является нулевым.

Заключение

Для измерения амплитуды УЗ-вибраций технологического инструмента могут быть использованы как контактные, так и бесконтактные методы. При значительной амплитуде вибраций (от 5 до 50 мкм) и невысоких требованиях к точности измерений применяют контактные датчики на основе пьезоэлектрических преобразователей. В случае необходимости непрерывного контроля УЗ-вибраций в производственном процессе предусмотрены бесконтактные методы с использованием емкостных датчиков.

Для определения оптимального положения инструмента в УЗ-системе микросварки, при котором частоты резонанса без инструмента и с установленным инструментом

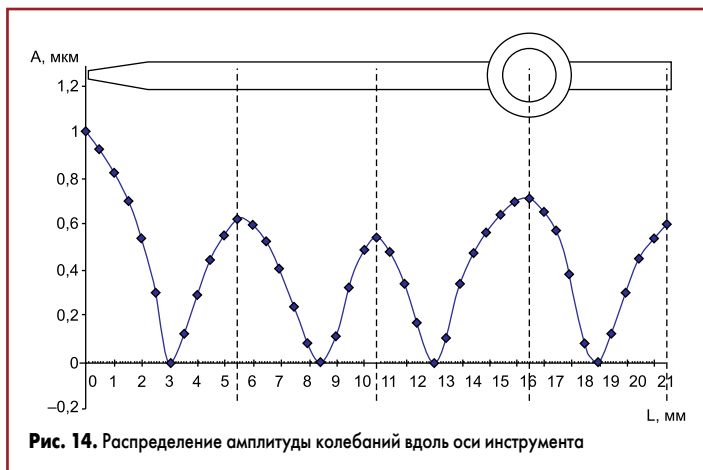


Рис. 14. Распределение амплитуды колебаний вдоль оси инструмента

совпадают между собой, а импеданс системы минимален, необходимы лазерные методы контроля вибраций малых амплитуд. Предложенная методика контроля параметров УЗ-преобразователей посредством лазерного сенда может оказать помощь при разработке новых ультразвуковых систем и инструментов и оценки возможности их согласования в различных диапазонах частот.

Литература

1. Handbook of Noise Measurement / Ed. by A. P. G. Peterson, E. E. Gross. N. Y.: General Radio Comp., 1963.
2. Донской А. В., Келлер О. К., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982.
3. Клубович В. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. Минск, Наука и техника, 1985.
4. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1981.
5. Абрамов О. В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000.
6. Ланин В., Чернышевич И., Бондарик В. Контроль амплитуды вибраций в ультразвуковом технологическом оснащении // Приборы и системы управления. 1998. № 10.
7. Ланин В., Дежкунов Н., Томаль В. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 2.
8. Ланин В., Хмыль А. Виброметр // Приборы и техника управления. 1993. № 4.
9. Кундас С. П., Ланин В. Л., Достанко А. П., Тявловский М. Д. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т. 2 / Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. Минск, 2003.
10. PSV-400 Scanning Vibrometer. www.politec.com
11. Ланин В., Петухов И., Федоров Н. Настройка ультразвуковых колебательных систем микросварки соединений в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 5.
12. ODS-10 F&K Physiktechnik. www.fkphysiktechnik.com
13. Ланин В., Петухов И. Оптимизация параметров ультразвуковых преобразователей повышенной частоты // Компоненты и технологии. 2012. № 3.
14. Брекелман М. Активный контроль вибраций в ультразвуковой микросварке проволокой. Усовершенствованная способность к разварке на сложных поверхностях // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 2.