

# Настройка ультразвуковых колебательных систем микросварки соединений в электронике

**Разработана система контроля амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента в процессах микросварки золотых и алюминиевых проводников. Правильное согласование элементов ультразвуковой технологической системы позволяет увеличить амплитуду колебаний инструмента и повысить прочность микросварных соединений при сварке на повышенных частотах.**

**Владимир Ланин,**  
профессор

vlanin@bsuir.by

**Игорь Петухов**

petuchov@kbtm.by

**Николай Федоров**

Высокая степень интеграции схем и уменьшение контактных площадок приводит к необходимости использования проволоки малого сечения из золота от 17,5 до 20 мкм и из алюминия (для плоских проводников толщиной 12,5–18 мкм, а для круглых проводников — диаметром от 18 до 25 мкм), особенно в изделиях СВЧ-электроники.

Одним из ключевых моментов в ультразвуковой (УЗ) сварке является трудность физического наблюдения процесса присоединения в момент его проведения. Разработка теории и практические исследования с целью решить эту проблему предпринимались с самого момента создания технологии УЗ-сварки, но строгой математической модели ультразвукового присоединения до сих пор не существует. Контроль обычно ограничивался визуальной проверкой сварного соединения, а прочность оценивалась выборочным разрушающим pull-тестом (петля подцепляется крючком и тянется до момента обрыва проволоки). К настоящему времени в практику контроля внедряются технологии растровой электронной и ультразвуковой микроскопии, а также фотоакустики.

Известно, что качественную работу любой установки присоединения выводов в изделиях электронной техники с использованием ультразвука определяет ее ультразвуковая система, включающая ультразвуковой преобразователь (УЗП) с установленным

рабочим инструментом и ультразвуковой генератор (УЗГ). Рост требований к производительности оборудования и уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах требуют прецизионной работы УЗ-системы и тщательного согласования УЗП с УЗГ, поскольку подводимые электрические колебания от УЗГ преобразуются УЗ-преобразователем в механические колебания. В свою очередь требуется согласование рабочего микроинструмента с УЗП.

Конструкция УЗ технологической системы микросварки состоит из следующих составных частей (рис. 1): пьезоэлектрического вибратора 1, состоящего из четырех или шести параллельно соединенных пьезокерамических колец, стянутых между собой шпилькой с металлическими накладками, и цилиндрического держателя (стакана) 2, закрепленного в узле волновода 3 и предназначенного для крепления УЗП в сварочной головке установки. На конце волновода закреплен микроинструмент 4 с помощью торцевого зажима. Сечение волновода уменьшается к месту крепления микроинструмента, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний.

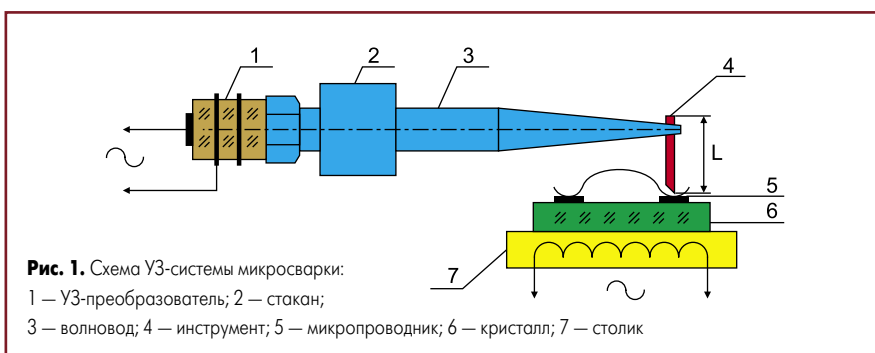
Требования к рабочему инструменту для УЗ-микросварки можно сформулировать следующим образом:

- Форма и размеры инструмента должны обеспечивать эффективную передачу энергии УЗ-колебаний.
- Материал инструмента должен обеспечивать минимальное затухание УЗ-колебаний и не должен вступать во взаимодействие с материалом вывода.

Для сохранения спектра собственных частот и вида колебаний (в частности, изгибных) необходимо соблюдать условие [1]:

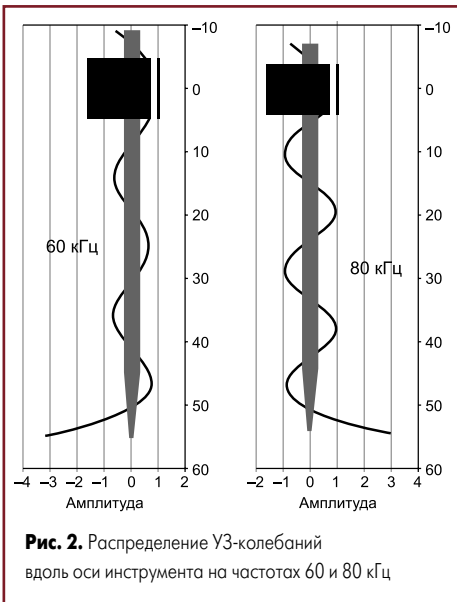
$$\lambda/d \geq (8-10), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны изгибных колебаний;  $d$  — диаметр сечения рабочего инструмента.



**Рис. 1.** Схема УЗ-системы микросварки:

1 — УЗ-преобразователь; 2 — стакан;  
3 — волновод; 4 — инструмент; 5 — микропроводник; 6 — кристалл; 7 — столик



Очень важным моментом использования УЗ колебательной системы микросварки является корректная установка микроинструмента в зажиме — так называемый вылет инструмента. Согласно [2] 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. Известно, что резонансная длина вылета инструмента связана следующим соотношением:

$$l/r \times l/\lambda_{np} = (1/(4\pi))(\beta \times l)^2, \quad (2)$$

где  $l$  — длина вылета инструмента;  $\lambda_{np}$  — длина продольной волны; множитель  $(\beta \times l)^2$  зависит от числа узлов в инструменте;  $r$  — радиус инструмента.

Для правильной установки инструмента ведущие производители обычно прилагают к поставляемому оборудованию специальные шаблоны. Для определения оптимального зажима микроинструмента в УЗП используют различные измерители (акустические микрофоны, лазерные интерферометры). При этом исследуется распределение узлов и пучностей вдоль оси инструмента, как показано на рис. 2 [3].

Вылет микроинструмента зависит от характеристик УЗП, резонансной частоты, материала, из которого изготовлен микроинструмент, и его геометрии. Например, для инструмента из карбида титана, используемого обычно для присоединения золотой проволоки, вылет на 0,5 мм меньше, чем у инструмента из карбида вольфрама, применяемого для присоединения алюминиевой проволоки.

Измерение и контроль электрических параметров УЗ-системы не вызывает сложностей, поскольку можно использовать стандартное измерительное оборудование в отличие от контроля механических колебаний ввиду малой амплитуды (порядка 0,2–1,5 мкм) и высокой частоты (от 60 до 120 кГц). Сложность заключается еще и в том, что измеритель-



ная система должна быть бесконтактной, то есть необходимо исключить воздействие на УЗ колебательную систему.

Лидером и монополистом на рынке подобных измерений является компания Polytec (Германия). Для исследования распределения 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. Его «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. Результатом интерференции двух лучей является изменение интенсивности излучения, фиксируемого фотоприемником. Это дает возможность измерения частот от 0 до 24 МГц и виброскорости от 0,02 мкм/с до 20 м/с.

В состав виброметра входят: контроллер OFV-5000, оснащенный аналоговым и цифро-

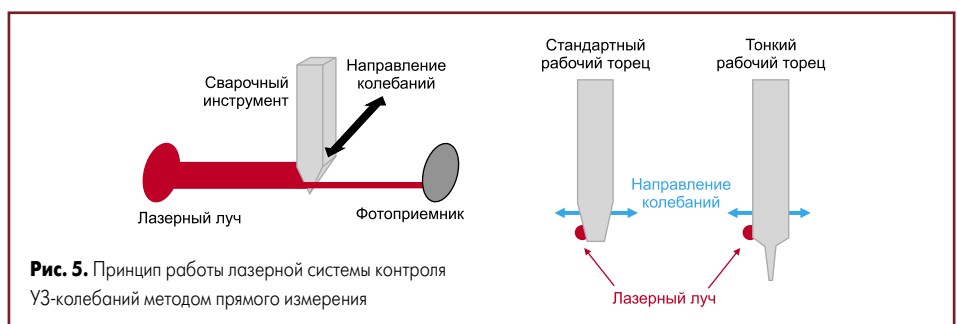
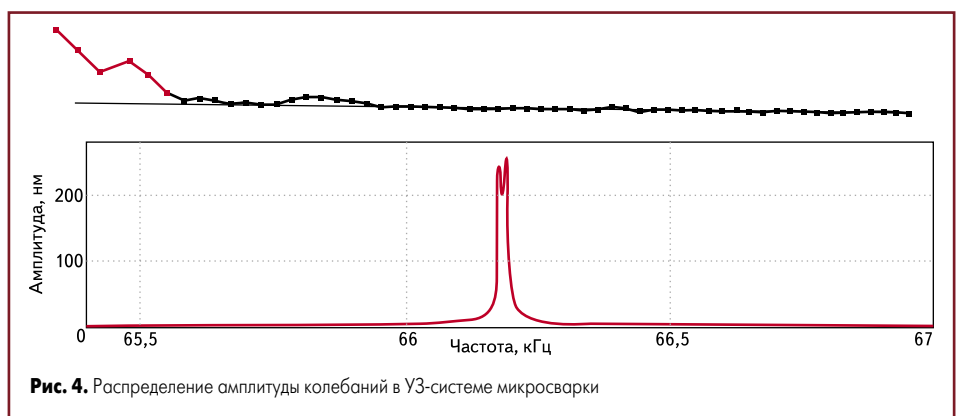
вым декодером скорости, измерительная головка, состоящая из сенсора виброметра PSV-I-400, высокоточного сканера и цветной видеокамеры с возможностью автофокусировки и 72-кратным увеличением, блок коммутации с кабелем длиной 10 м, промышленный персональный компьютер с операционной системой Windows XP или Vista 64 и штатив с поворотной-наклонным переходником (рис. 3).

При скорости сканирования до 30 точек/с диапазон сканирования составляет  $\pm 20^\circ$  по осям X, Y; угловое разрешение  $< 0,002^\circ$ , а 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, предоставленной для теста компанией «НОВАТЕСТ» (Москва). Распределение амплитуды колебания вдоль сварочного инструмента, приведенное на рис. 4, показывает, что резонансная частота системы — 66,2 кГц, а амплитуда колебаний инструмента составляет 0,25 мкм [4]. Данная модель виброметра позволяет измерять колебания в диапазоне до 80 кГц, для более высокого диапазона нужно использовать другой контроллер. С помощью подобной системы не составляет труда не только определить распределение колебаний вдоль оси инструмента, но и исследовать спектр колебаний.

Существует и более простой метод для контроля колебаний на рабочем торце инструмента — метод прямого измерения колебаний, при этом инструмент находится между источником сфокусированного лазерного излучения и фотоприемником. Примером подобной системы является система ODS-10 компании F&K Physiktechnik (Германия) [5]. Принцип работы такой системы показан на рис. 5.

Для проведения экспериментальных исследований и проверки результатов моделирования распределения амплитуды УЗ-колебаний



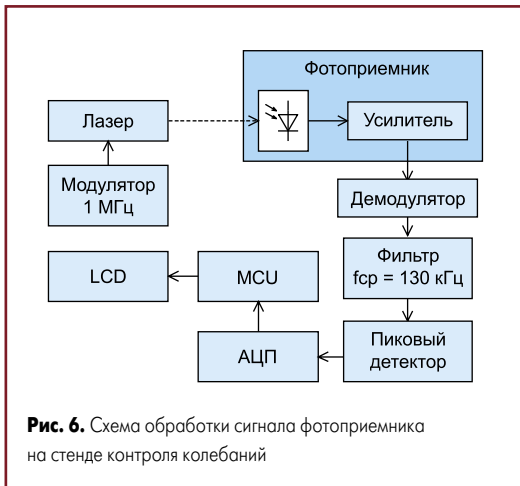


Рис. 6. Схема обработки сигнала фотоприемника на стенде контроля колебаний

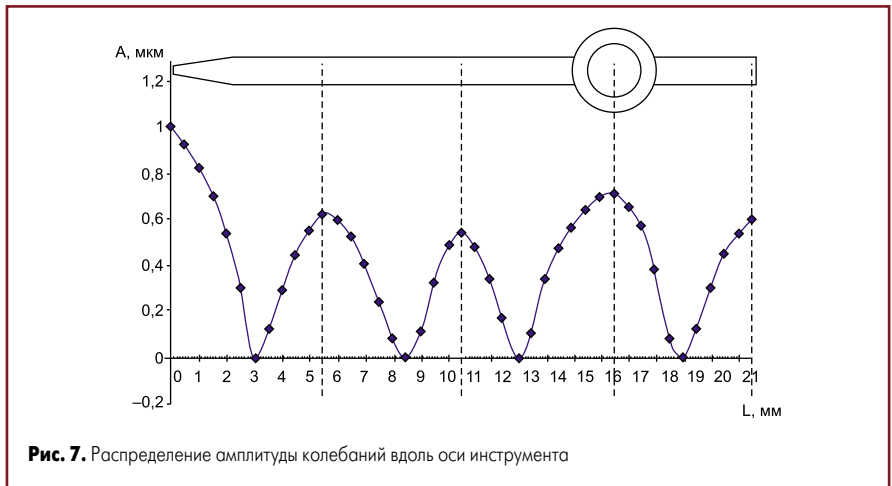


Рис. 7. Распределение амплитуды колебаний вдоль оси инструмента

вдоль оси сварочного инструмента разработан и изготовлен стенд контроля. Принцип его работы основан на контроле сигнала фотоприемника лазерного полупроводникового излучателя, луч которого наполовину перекрывается телом рабочего инструмента. Для стенда применен метод прямого контроля амплитуды механических колебаний, в отличие от сложных доплеровских интерферометров, измеряющих скорость колебаний и математически пересчитывающих ее в амплитуду. Дополнительным преимуществом метода является 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. 6.

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 выво-

дится на ЖК-дисплей (LCD). Синусоидальный 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, соответственно, УЗП контролируется цифровым штангенциркулем.

Таким образом, сдвигая положение инструмента относительно лазерного луча, можно контролировать распределение амплитуды 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 4 узловыми точками, как показано на рис. 7.

Мы использовали осциллограф TDS2024B фирмы Tektronix с полосой пропускания 200 МГц, который позволяет исследовать спектр входных сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. При оптимальном согласовании инструмента с преобразователем вид спектра такой, как на рис. 8.

В результате исследований обнаружено, что при рассогласовании инструмента с преобразователем, то есть при произвольном вылете инструмента, в спектре колебаний появляются гармоники (рис. 9), расположенные в районе резонансной частоты, а выходной сигнал модулирован по амплитуде (рис. 10). Подобные гармоники возникают также при плохом прилегании поверхности инструмента

к поверхности установочного отверстия инструмента в УЗП. На осциллограмме (рис. 9) видно, что частота резонанса равна 96 кГц вместо 94 кГц.

Модуляция сигнала колебаний торца инструмента означает сложный характер колебаний, который может привести к дестабилизации сварочного процесса. Таким образом, с помощью этого метода можно определить оптимальное согласование с инструментами различной геометрии и длины.

О качестве УЗ-преобразователя можно судить по таким параметрам, как частота собственного резонанса преобразователя, его сопротивление на резонансной частоте и форма кривых модуля и фазы импеданса преобразователя. Современный УЗ пьезокерамический преобразователь характеризуется сопротивлением 10–30 Ом на резонансной частоте между 90 и 120 кГц [4]. Низкое значение импеданса УЗП обеспечивает минимальное смещение узловых точек на инструменте, что позволяет стабилизировать сварочный процесс.

На рис. 11 представлена функциональная схема системы диагностики ультразвуковых преобразователей. Система выполнена в виде автономного блока. Работа системы основана на микросхеме AD5933 компании Analog Devices [6].

Встроенный в AD5933 DDS (Direct Data Synthesis) генератор подает на усилитель мощности (УМ) гармонический сигнал заданной частоты. Далее усиленный сигнал передается на измерительную цепь, к которой подключается УЗП. Напряжение на выходе измери-

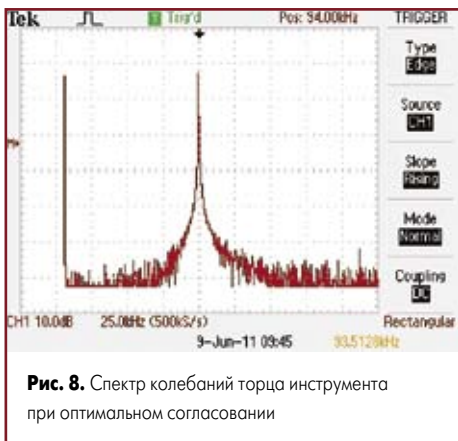


Рис. 8. Спектр колебаний торца инструмента при оптимальном согласовании



Рис. 9. Спектр колебаний торца инструмента при рассогласовании с преобразователем

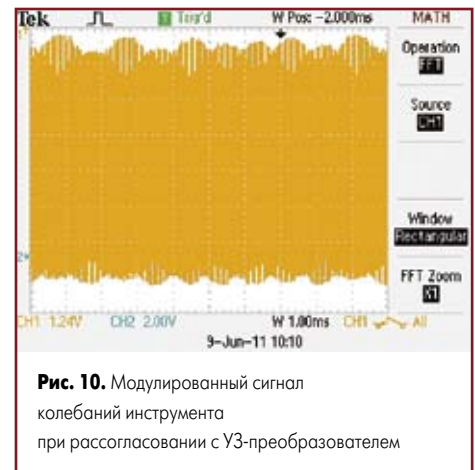


Рис. 10. Модулированный сигнал колебаний инструмента при рассогласовании с УЗ-преобразователем

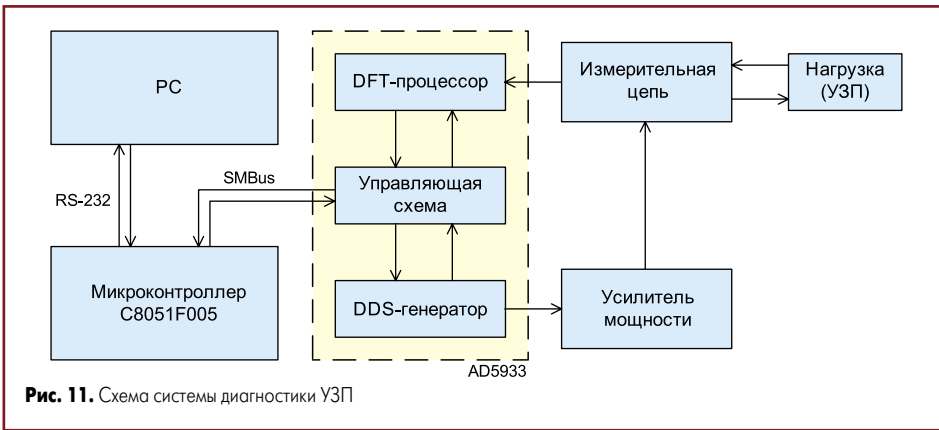


Рис. 11. Схема системы диагностики УЗП

тельной цепи преобразуется встроенным АЦП микросхемы AD5933 и передается на интегрированный DFT-процессор (Discrete Fourier Transform, дискретное преобразование Фурье). Полученные на выходе данные характеризуют отклик измерительной цепи на сигнал заданной частоты. Эти данные по интерфейсу RS-232 микроконтроллера C8051F005 фирмы Silabs [8] передаются в управляющую программу на PC. Разработанная система диагностики УЗ-преобразователей позволяет измерить комплексное сопротивление УЗП и вывести на экран монитора компьютера графики кривых модуля и фазы импеданса от частоты. Точность измерения модуля импеданса составляет  $\pm 5\%$  в диапазоне от 10 до 200 Ом и  $\pm 15\%$  в диапазоне от 200 Ом до 1 кОм. Точность измерения фазы составляет  $\pm 3^\circ$  в диапазоне  $\pm 3$  кГц от точки резонанса. Измерения можно проводить в диапазоне от 10 до 120 кГц.

Управляющая программа выполняет две функции: заключительный этап обработки данных с выводом на экран и предварительную настройку прибора, включая калибровку. В главном окне программы (рис. 12) слева размещены поля для задания области диагностики: начальная частота исследуемого диапазона, разрешение по частоте и количество точек измерения. Также здесь размещена кнопка перехода в меню калибровки прибора. Результаты измерений модуля и фазы импеданса отображаются в правом поле программы.

На рис. 13 представлены кривые модуля и фазы импеданса качественного ультразвукового преобразователя, а на рис. 14 — дефектного УЗ-преобразователя. По приведенным ха-

рактеристикам хорошо видны различия между этими преобразователями. На рис. 13 видно, что точка резонанса (96,5 кГц) — единственная с импедансом 30 Ом и не имеет паразитных резонансов в диапазоне частот 90–104 кГц, тогда как дефектный УЗП (рис. 14) имеет паразитные резонансы в районе основной резонансной частоты (64,5 кГц) из-за ошибок сборки УЗП.

Дополнительным признаком неисправности преобразователя является его высокий импе-

данс (100 Ом) на резонансной частоте. Как показано в [8], подобные паразитные резонансы также могут возникнуть при определенном соотношении размеров пьезокерамических колец и металлических накладок.

Возможной причиной высокого импеданса преобразователя может быть микротрещина в пьезокерамике или плохое прилегание сжимаемых поверхностей. Дополнительные резонансы, расположенные близко к основной резонансной частоте, могут привести к нарушению корректной работы системы фазовой автоподстройки частоты УЗГ, а в результате — к дестабилизации процесса микросварки.

**Заключение**

Разработанная система позволяет провести диагностику ультразвуковой сварочной системы установки присоединения выводов и оптимальное согласование микроинструмента с УЗ-преобразователем. Эта система может быть полезна для оперативной и периодической диагностики УЗ сварочной системы оборудования присоединения выводов в цеховых усло-

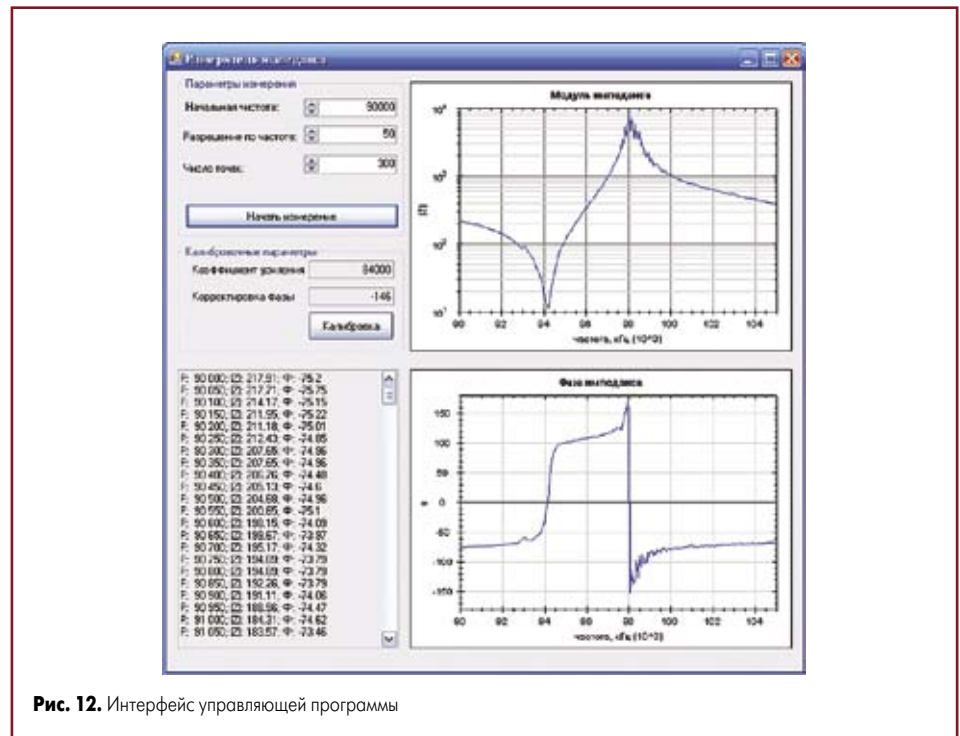


Рис. 12. Интерфейс управляющей программы

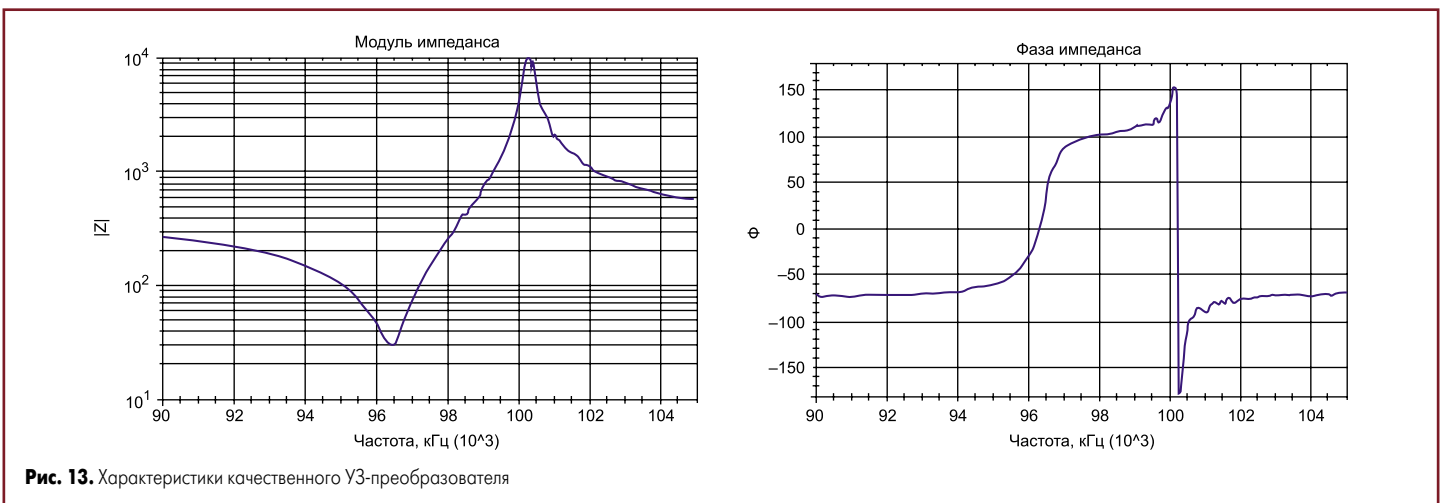
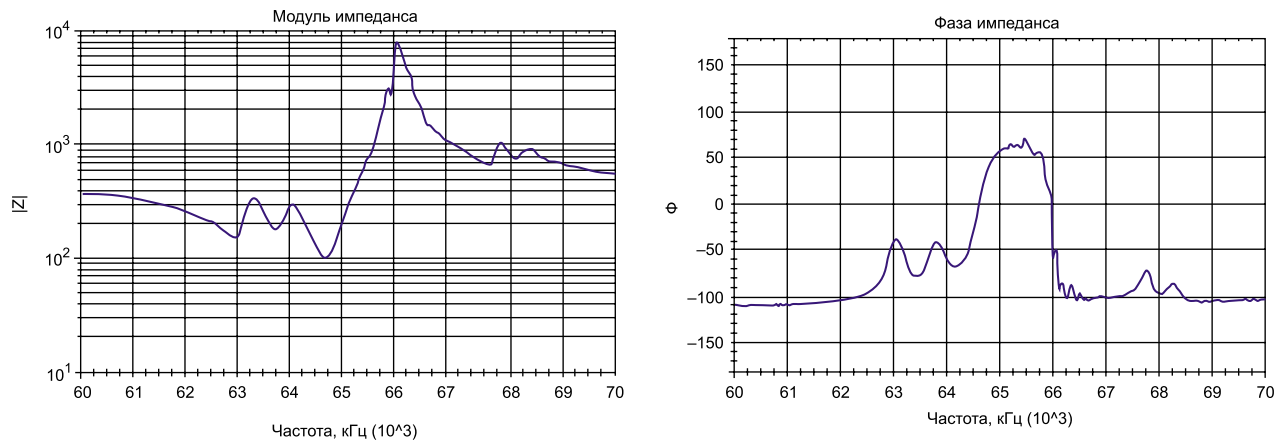


Рис. 13. Характеристики качественного УЗ-преобразователя



**Рис. 14.** Характеристики некачественного УЗ-преобразователя

виях, поскольку не требуется трудоемкой разборки сварочной головки и использования стандового оборудования.

### Литература

1. Кундас С. П., Ланин В. Л., Достанко А. П. и др. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т. 2. Минск: Бестпринт, 2003.
2. Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г. Ультразвуковая сварка. М.: Машгиз, 1962.
3. Harman G.G. Wire bonding in microelectronics. N.Y.: McGraw Hill, 2010.
4. Ланин В. Л., Петухов И. Б., Мордвинцев Д. В. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 1.
5. ODS-10 data sheet: [www.fkphysiktechnik.com](http://www.fkphysiktechnik.com)
6. AD 5933, 1 MSPS, 12-bit Impedance Converter Network Analyzer: <http://www.analog.com/DataSheet/AD5933.pdf>
7. Николайчук О. И. X51-совместимые микроконтроллеры фирмы CYGNAL. М.: ИД «СКИМЕН», 2002.
8. Shuyu L. Analysis of the sandwich piezoelectric ultrasonic transducer in coupled vibration // J. Acoustic. Society. America. 117 (2). Feb. 2005.