

Контроль параметров ультразвуковых генераторов для определения оптимальных режимов ультразвукового воздействия на различные среды

First A. Author, Second B. Author, Jr., and Third C. Author, *Member, IEEE*

Аннотация — статья посвящена созданию и использованию специализированного измерительного комплекса для ускорения процесса настройки и диагностики ультразвуковых генераторов. Представлены результаты использования комплекса на конкретных задачах.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные ультразвуковые генераторы представляют собой электронные устройства, преобразующие энергию электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты. Одним из основных требований, предъявляемых к электронным генераторам, является необходимость обеспечения устойчивой работы на резонансной частоте ультразвуковой колебательной системы при любых нагрузках, мощностях излучения, типе подключенной колебательной системы и виде используемого рабочего инструмента. В то же время область применения ультразвуковых аппаратов стремительно расширяется, стремительно растут требования к эксплуатационным характеристикам ультразвуковых аппаратов. Для удовлетворения этих требований необходимо оптимизировать конструкцию ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) практически для каждой отдельной задачи, в результате чего параметры колебательных систем существенно изменяются (добротность, резонансная частота, наличие побочных резонансов, чувствительность к влиянию акустической нагрузки и т.п.).

Индивидуальные особенности проектируемых колебательных систем обуславливают необходимость корректировки режимов работы систем управления электронного генератора (системы фазовой автоматической подстройки частоты – ФАПЧ, системы стабилизации амплитуды колебаний, мощности излучения, системы).

Для качественного управления режимами работы УЗ аппарата в целом, необходимо контролировать около

десять электрических параметров, как самого генератора, так и косвенно характеризующих параметры УЗКС.

Для упрощения настройки систем ультразвукового генератора, оптимизации их функционирования, как в режиме холостого хода, так и в рабочих условиях, возникла необходимость разработки измерительного комплекса для эмуляции работы ультразвукового генератора, с возможностью одновременного измерения характеристик электрических сигналов ультразвукового генератора, и системой протоколирования, с целью постобработки параметров генератора, полученных при его работе в реальных условиях.

II. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

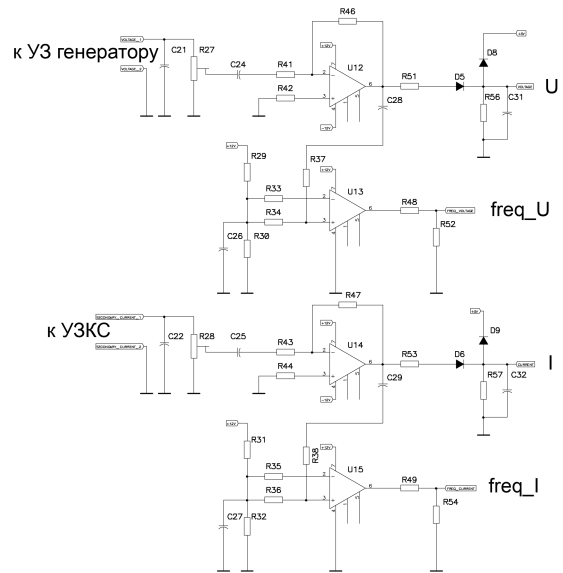


Рисунок 1. Принципиальная электрическая схема измерительных цепей.

Измерительный комплекс состоит из устройства измерения электрических параметров (принципиальная электрическая схема измерительных цепей представлена на рисунке. 1) и программного обеспечения для протоколирования и обработки измеренной информации, а так же управления режимами работы устройства измерения и ультразвукового генератора.

Схема подключения измерительного комплекса представлена на рисунке. 2. Разработанный измерительный комплекс подключается к диагностическому разъему ультразвукового генератора, а так же в «разрыв» кабеля питания ультразвуковой колебательной системы. Таким образом все сигналы влияющие на работу ультразвукового аппарата проходят непосредственно через измерительный комплекс.

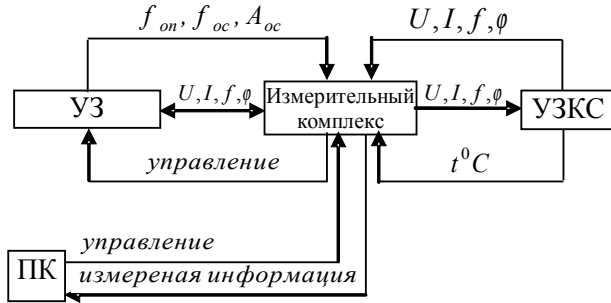


Рисунок 2. Схема подключения измерительного комплекса.

Такое подключение обеспечивает возможность контроля следующих параметров и сигналов:

1. Сигнал опорной частоты, снимаемый с выхода задающего генератора, который имеет прямоугольную форму, является цифровым и непосредственно используется измерительным комплексом;

2. Сигнал обратной связи, который выделяется специальной дифференциальной схемой АЧХ и ФЧХ которого соответствует АЧХ и ФЧХ колебательной скорости рабочей поверхности УЗКС;

3. Сигнал, пропорциональный напряжению на пьезокерамических элементах колебательной системы. Напряжение на колебательной системе. Проходит через пиковый детектор и усилитель с выпрямительной системой, расположенные непосредственно в измерительном комплексе (рисунок. 1, сигналы U и freq_U);

4. Сигнал, пропорциональный току, потребляемому колебательной системой. Проходит через пиковый детектор и усилитель с выпрямительной системой, расположенные непосредственно в измерительном комплексе (рисунок 1, сигналы I и freq_I);

5. Сигнал с цифрового датчика температуры закрепленного на пьезокерамике УЗКС.

Таким образом непосредственно, и косвенным образом осуществляется контроль следующих параметров:

1. Величина напряжения на колебательной системе. Пропорциональна величине сигнала U (рисунок. 1);

2. Величина силы тока, потребляемого колебательной системой. Пропорциональна величине сигнала I (рисунок. 1);

3. Частота напряжения на колебательной системе. Величина обратная периоду сигнала freq_U (рисунок. 1);

4. Разность фаз напряжения и тока на колебательной системе. Пропорциональна задержке между фронтами

двух цифровых сигналов, freq_U и freq_I (рисунок. 1);

5. Разность фаз между двумя любыми периодическими сигналами (с опорного генератора, обратной связи, тока или напряжения на колебательной системе). Пропорциональна задержке между фронтами двух цифровых сигналов;

6. Значение температуры на керамике колебательной системы. Вычисляется по градуировочной таблице в зависимости от полученного значения с цифрового датчика температуры.

Для управления работой измерительного комплекса, а так же протоколирования и обработки измеренной информации используется специально разработанное программное обеспечение (ПО) для персонального компьютера. Связь осуществляется посредством протокола RS-232. Программное обеспечение имеет графический интерфейс, и обладает следующими возможностями:

1. Принимаемые данные в режиме реального времени отображаются на экране ПК в виде графиков, с автоматическим масштабированием. После окончания приема данных существует возможность отключить отображение некоторых, или всех, кроме одного, графиков. Существует возможность масштабирования - увеличения или уменьшения определенной части графиков;

2. Существует возможность обработки принятых данных посредством ряда алгоритмов фильтрации, таких как «скользящая» фильтрация, усреднение по нескольким точкам, отбрасывание знака.

3. Существует возможность сохранения результатов измерения в виде файла формата «csv». В дальнейшем файл может быть загружен в ПО.

Измерительный комплекс может работать в двух режимах:

1. Измерение и протоколирование параметров. При этом управление генератором осуществляется штатным микроконтроллером. Измерительный комплекс имеет возможность изменять основные параметры работы генератора (мощность, время работы, запуск/остановка генератора);

2. Функции управления ультразвуковым генератором полностью выполняются измерительным комплексом (режим эмуляции).

Первый режим применяется когда необходимо получить информацию о параметрах ультразвукового генератора, в режиме реального времени, в течение некоторого промежутка времени. Режим может использоваться для визуализации и проверки корректности работы систем электронного генератора.

Второй режим предназначен в основном для снятия АЧХ параметров колебательных систем, эмуляции не стандартных способов управления генератором, и для испытаний в различных режимах и условиях.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В процессе настройки малогабаритного ультразвукового технологического аппарата "Волна" было обнаружено, что при уменьшении напряжения питания ультразвуковой колебательной системы ниже некоторого значения, значительно снижалась точность удержания резонансной частоты. В результате чего при установке мощности работы ультразвукового генератора, в значение 50-60%, периодически происходил перезапуск ультразвукового генератора из-за срыва с резонансной частоты. Для определения причины подобного явления, с помощью измерительного комплекса, была произведена серия измерений зависимости напряжения на электродах пьезокерамики от частоты, при различных значениях напряжения питания УЗКС. Результаты измерений представлены на рисунке. 3. В результате анализа полученных данных были доказаны следующие предположения, высказанные в процессе настройки:

1. При уменьшении напряжения питания УЗКС, резонансная частота колебательной системы уменьшается;
2. При уменьшении напряжения питания УЗКС, ее резонансные свойства изменяются. При некотором напряжении, резонансные свойства исчезают практически полностью. Таким образом возникает необходимость ограничения минимального напряжения питания УЗКС, что приводит к сужению диапазона регулировки мощности ультразвукового аппарата.

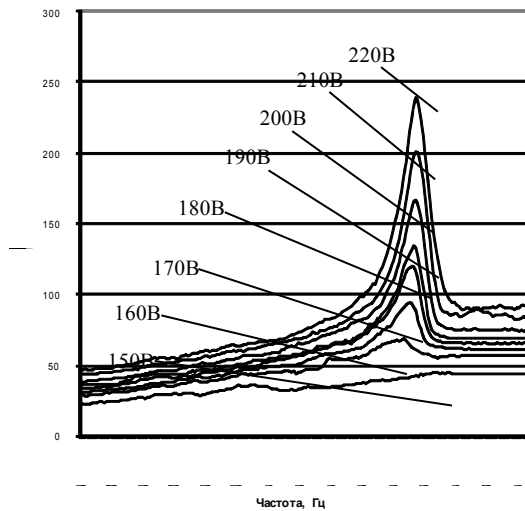


Рисунок 3. Зависимости напряжения на электродах пьезоэлементов колебательной системы от частоты, полученные при различных значениях питающего напряжения

У «идеальной» колебательной системы на резонансной частоте практически полностью исчезает реактивная составляющая импеданса. Значение разности фаз между напряжением и током на колебательной системе стремится к нулю. В результате чего вклад в значение полной мощности активной составляющей значительно превосходит вклад реактивной составляющей.

Параметры «реальных» колебательных систем, иногда, значительно отличаются от «идеальных». Так в процессе настройки ультразвукового технологического аппарата «Булава» возникла необходимость в поиске критерия нахождения резонансной частоты и удержания на ней. На рисунке. 4 представлены частотные зависимости напряжения и тока на колебательной системе, разность фаз между ними, а так же активная мощность, потребляемая колебательной системой. Измерение напряжения, тока и разности фаз производилось с помощью измерительного комплекса. Активная мощность определялась по следующей формуле:

$$P_{ак} = UI \cos(\varphi) \tag{1}$$

где U - напряжение на колебательной системе;

I - ток на колебательной системе;

φ - разность фаз между током и напряжением.

Как видно из рисунка. 4, при работе на частоте отличной от резонансной (интервал 1), напряжение и ток на колебательной системе остаются постоянными, как и разность фаз между ними. Активная мощность близка к нулю, поскольку разность фаз между напряжением и током стремится к 90° , и полный импеданс колебательной системы имеет реактивный характер. При приближении к резонансной частоте (интервал 2), напряжение и ток на колебательной системе имеет свой минимум.

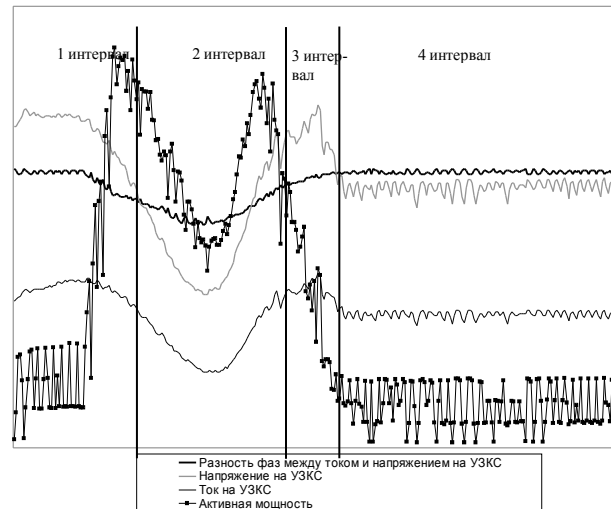


Рисунок 4. Зависимости напряжения и тока на УЗКС, разности фаз между ними и активной мощности от частоты

Это происходит из-за увеличения активной составляющей импеданса колебательной системы. По этой же причине уменьшается разность фаз между напряжением и током. Активная мощность так же имеет минимум, но отличный от нулевого значения. На интервале 3 происходит уход от резонансной частоты, в результате чего параметры стремятся принять значения соответствующие началу 1 интервала. Затем было искусственно уменьшено (для примера) напряжение питания колебательной системы (интервал 4), в результате

чего значение напряжения и тока на электродах пьезокерамики колебательной системы уменьшается, а разность фаз между ними остается постоянной.

В результате анализа зависимостей представленных на рисунке. 4, было доказано отсутствие перехода через нуль или равенство нулю разности фаз между напряжением и током на колебательной системе. Относительное изменение разности фаз на резонансной частоте примерно соответствует 15%. При первичной настройке ультразвукового генератора при помощи двухлучевого осциллографа, визуальное определение такого незначительного изменения разности фаз, при подходе к резонансной частоте, представляет значительную сложность.

На рисунке. 5 представлена хронология изменения таких параметров как напряжение, ток на колебательной системе, разность фаз между ними и текущая рабочая частота, в процессе ультразвуковой сварки термопластичного материала с помощью комплекта оборудования для ультразвуковой сварки термопластичных материалов «Гиминей-ультра 2». Измерение производилось измерительным комплексом в режиме эмуляции. Алгоритм регулировки мощности был отключен.

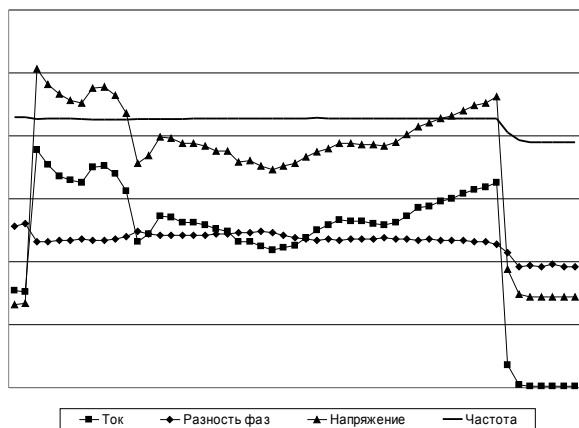


Рисунок 5. Измерение параметров в процессе сварки термопластичного материала.

Как видно из рисунка 5 в процессе ультразвуковой сварки, происходит размягчение термопластичного материала, в результате чего изменяется акустическая нагрузка на УЗКС, что обуславливает изменение электрических параметров УЗКС, таких как тока и напряжения на электродах пьезоэлементов колебательной системы, наблюдается так же небольшое увеличение разности фаз между напряжением и током.

Была произведена серия измерений при различных условиях проведения УЗ сварки (изменялось усилие прижима, время сварки и т.д.), с целью определить критерии получения качественного сварного соединения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была доказана эффективность применения разработанного измерительного комплекса при настройке и диагностике ультразвуковых генераторов, при проектировании систем ФАПЧ, при тестовой прогонке ультразвукового аппарата.

За счет построения измерительного комплекса на современной элементной базе становится возможным находить даже незначительные изменения параметров, что при использовании аналоговой техники представляло бы значительную сложность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, M.V. Khmelev "Adaptive Phase Lock System of Ultrasonic Electronic Generators", International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2006.
- [2] Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. Справочник. – СПб.: Политехника, 1994.