

УДК 621.373.5:534.838.7

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне, А.Д. Абрамов

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

E-mail: vnh@bti.secna.ru

Рассмотрены вопросы проектирования и эксплуатации электронных генераторов для ультразвуковой интенсификации процессов в газовых средах. На основании анализа особенностей современных пьезоэлектрических колебательных систем с дисковыми излучателями, совершающими высокоамплитудные изгибные колебания (высокая добротность, многочастотность, многопакетность пьезоэлементов) сформулированы общие требования к электронным генераторам и предложены новые подходы и схемные решения непрерывного контроля параметров системы и установления оптимальных режимов работы электронного генератора.

Ключевые слова:

Ультразвук, электронный генератор, газовые среды, интенсификация физико-химических процессов.

Key words:

Ultrasonic, electronic generator, gas mediums, intensification of physics and chemical process.

Ультразвуковое (УЗ) оборудование широко применяется для интенсификации различных физико-химических процессов, в твердых, жидких и газовых средах [1].

В настоящее время, благодаря созданию и применению ультразвуковых излучателей нового типа [2] переживают второе рождение технологии интенсификации процессов, протекающих в газовых средах. Наибольший интерес среди таких технологий представляет коагуляция природных и техногенных воздушно-капельных дисперсий [3], что обусловлено необходимостью обеспечения непрерывного функционирования взлетно-посадочных полос аэропортов, автомобильных дорог и портов в условиях туманов; исключения распространения воздушно-капельных отравляющих веществ при катастрофах и террористических актах; предотвращения образования опасных концентраций взрывоопасных пылей в угольных шахтах, на химических и мукомольных предприятиях.

Используемое для интенсификации процессов в газовых средах ультразвуковое оборудование (ультразвуковой аппарат) состоит из двух основных элементов, взаимодополняющих друг друга.

Основной элемент оборудования – ультразвуковая колебательная система, состоящая из пьезоэлектрического преобразователя, обеспечивающего преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от электронного генератора, волноводной усилительной структуры и излучателя, осуществляющего введение ультразвуковых колебаний в газовую среду, подвергаемую УЗ воздействию.

Для питания ультразвуковой колебательной системы используется электронный генератор [3], обеспечивающий преобразование энергии электрической бытовой или промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты (более 20 кГц), представляющих собой синусоидальные колебания с амплитудой в несколько сотен вольт.

Электронный генератор, УЗ колебательная система и технологическая среда, подвергаемая ультразвуковой обработке, представляют собой элементы единой системы, согласованные друг с другом и влияющие опосредованно или непосредственно друг на друга. Нарушение условий оптимального согласования любых из элементов этой цепи может привести к ухудшению процесса энергопереноса в системе «генератор – излучатель – обрабатываемая среда» и снижению эффективности ультразвукового воздействия. В связи с этим при проектировании УЗ оборудования возникает необходимость обеспечения оптимального согласования параметров генератора и колебательной системы при любых изменениях физических свойств (волновое сопротивление) обрабатываемой среды в процессе УЗ воздействия.

Рассмотрим далее более подробно особенности проектирования УЗ электронных генераторов, предназначенных для питания УЗ колебательных систем, используемых для воздействия на газовые среды.

Отличительной особенностью таких колебательных систем является способность генерировать ультразвуковые колебания с интенсивностью не менее 140 дБ, поскольку при меньших интенсивностях эффективность применения ультразвукового воздействия для интенсификации процессов в газовых средах падает практически до нуля. Возможность формирования колебаний такой интенсивности обеспечивается за счет применения в качестве излучателей изгибно-колеблющихся излучателей дискового типа [2]. Для формирования в газовых средах колебаний ультразвуковой частоты дисковый излучатель, при заданных размерах ультразвуковой колебательной системы, возбуждается на нечетной моде (пятой, седьмой, девятой и т. д.) основной резонансной частоты изгибных колебаний диска. Для обеспечения высоких мощностных характеристик в конструкции преобразователя использовано многопакетное расположение пар

пьезоэлементов, рис. 1. Такая конструктивная схема позволяет объединить параллельно установленные пакеты пьезоэлементов, улучшив теплоотвод от каждого из пакетов за счет увеличения массы рабочей излучающей накладки преобразователя, и обеспечить повышение потребляемой мощности даже в сравнении с простым суммированием отдельных преобразователей.

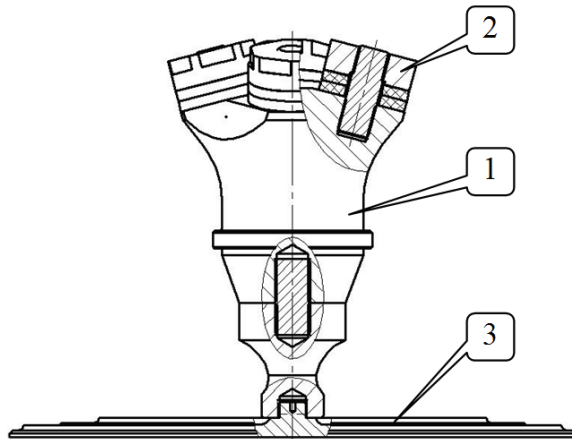


Рис. 1. Эскиз дискового излучателя

Стержневой волновод – 1, возбуждается с одной стороны несколькими пьезокерамическими пакетами – 2, с другой стороны к нему крепится диск – 3. Число пьезокерамических пакетов может достигать до 4-х, причем каждый пакет содержит до 4-х пьезокерамических элементов. Все пьезокерамические пьезоэлементы преобразователей электрически соединяются параллельно, таким образом, излучатель подобного типа имеет большую входную статическую электрическую емкость (до 60 нФ).

Излучатели подобного типа характеризуются высокой добротностью, многочастотностью, а при несоблюдении условий частотного согласования и наличия гармоник в питающем напряжении высокой вероятностью возбуждения на паразитной гармонике.

При создании электронных генераторов необходимо учитывать, что волновое сопротивление газовых сред на порядки меньше, чем, например, у жидкостей. Это обуславливает необходимость более мощной «раскачки» электронным генератором ультразвуковой колебательной системы.

Кроме того, малый коэффициент выхода акустической энергии из излучателя в газовую среду (менее 0,01 от запасенной излучателем энергии) и применение для изготовления излучателя титанового сплава повышает добротность УЗ колебательной системы до 1000 и более, что обуславливает повышенные требования к качеству работы системы фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) электронного генератора, удерживающей резонансный режим работы УЗ излучателя и генератора.

Стабильность волнового сопротивления газовых сред к ультразвуковому воздействию широкого диапазона мощностей (до 140 дБ и более) обеспечивает согласованный режим энергопереноса в системе «генератор – излучатель – обрабатываемая среда».

Однако, низкий коэффициент теплопередачи газовых сред, обуславливает существенный нагрев УЗ излучателей (до 100 °С и более), что приводит к смещению резонансной частоты УЗ излучателей в область более низких частот (например, резонансная частота излучателя может понижаться от 20 до 18 кГц при изменении температуры от 20 до 100 °С).

Рассмотренные конструктивные и функциональные особенности используемых колебательных систем накладывают определенные требования к электронным ультразвуковым генераторам, которые должны быть реализованы при создании УЗ оборудования для интенсификации процессов в газовых средах.

На рис. 2 представлена структура электронного генератора, разработанного для питания ультразвуковых колебательных систем, предназначенных для воздействия на газовые среды при интенсификации различных процессов.

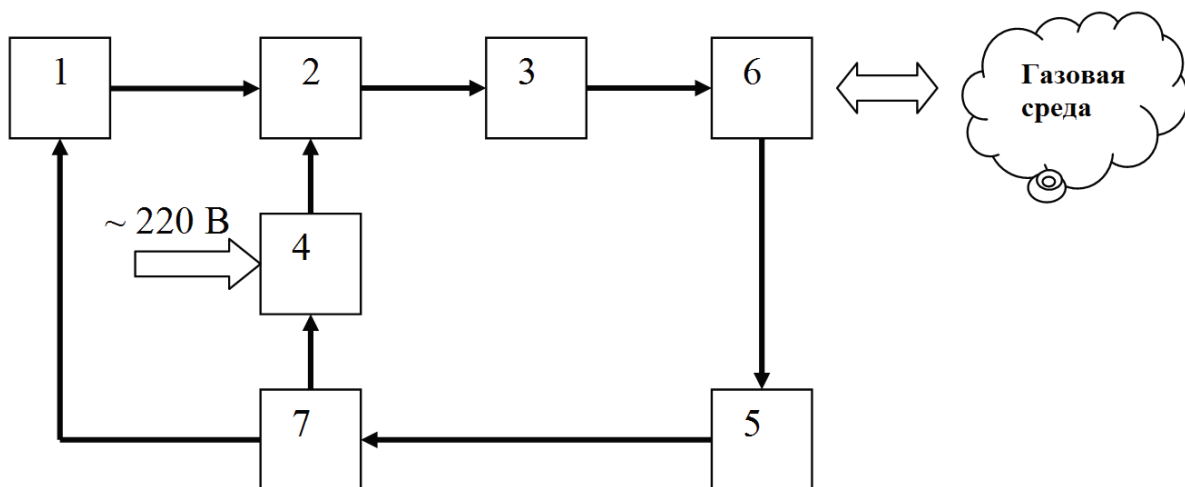


Рис. 2. Структура ультразвукового электронного генератора

Возможные изменения рабочей частоты системы и ее добротность приводят к тому, что задающий управляемый генератор — 1 обеспечивает перестройку частоты в диапазоне частот от 18,0 до 20,1 кГц с шагом не более 2 Гц. Диапазон перестройки определяется смещением резонансной частоты УЗ излучателя за счет его разогрева в процессе работы. Малая дискретность шага перестройки по частоте обусловлена высокой добротностью УЗ излучателя и соответственно малой шириной амплитудно-частотной характеристики излучателя, около 50 Гц.

Силовой инвертор — 2, в качестве которого выступает мостовой или полумостовой преобразователь, работающий в режиме переключения, обеспечивает импульсное возбуждение согласующей трансформаторно-дроссельной схемы — 3.

Согласующий узел — 3 обеспечивает электрическое согласование выходного сопротивления электронного генератора, которое является активным, с входным сопротивлением ультразвуковой колебательной системы — 6, характер которого зависит от частоты возбуждения и на резонансной частоте для случая системы с пьезоэлектрическим преобразователем, является активно-емкостным.

Резонансный электрический LC контур, входящий в состав схемы согласования — 3, обеспечивает необходимый уровень напряжения на пьезокерамических элементах преобразователя (амплитуда переменного напряжения на электродах пьезоэлементов преобразователя может достигать 2500 В), входящего в состав УЗ колебательной системы. Кроме всего, LC контур, входящий в состав схемы согласования, обеспечивает выделение первой гармоники из сигнала прямоугольной формы, который от ключевой схемы — 2 генератора поступает на узел согласования — 3.

Питание излучателя напряжением, форма которого близка к синусоидальной, при использовании излучателей с изгибно-колеблющимся диском, является важным моментом, поскольку наличие в питающем сигнале посторонних гармоник провоцирует возбуждение паразитных мод колебаний в излучателе, снижая эффективность работы излучателя на основной моде.

Регулятор напряжения — 4 обеспечивает возможность регулировки напряжения питания силового инвертора — 2, что позволяет управлять мощностью УЗ воздействия в диапазоне от 0 до 100 %.

Блок элементов обратной связи — 5 обеспечивает получение сигналов обратной связи, используемых системой управления частотой генератора и системой управления амплитудой ультразвуковых колебаний для удержания резонансного режима работы излучателя и стабилизации амплитуды колебаний его излучающей поверхности соответственно.

Блок управления — 7 является центральным узлом электронного генератора, обеспечивающим

согласованное функционирование всех систем и блоков электронного генератора. По сути это микропроцессорная система, работающая под управлением специальной программы.

В процессе работы электронного генератора одновременно работает несколько систем: сканирования частотного диапазона и поиска резонансной частоты излучателя; удержания резонансного режима работы излучателя и электронного генератора; обнаружения «срывов» в работе генератора и его повторного перезапуска; управления и стабилизации мощности ультразвукового излучения; обнаружения низкочастотных модуляций (модуляций звукового диапазона) и аварийного отключения электронного генератора.

Большинство из перечисленных систем являются типовыми для электронных УЗ генераторов. Однако при их работе в составе оборудования для интенсификации процессов в газовых средах проявляются некоторые особенности. Рассмотрим подробно функционирование некоторых из систем, учитывая особенности работы с излучателями, предназначенными для работы в газовых средах.

Ультразвуковые колебательные системы работают эффективно только в резонансном режиме, т. е. на резонансной частоте дискового излучателя. Практически во всех системах автоматической подстройки частоты (АПЧ) электронных генераторов в качестве критерия настройки на резонансную частоту является стремление к нулю сдвига фазы между током и напряжением на пьезокерамических элементах излучателя.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотная характеристика УЗ колебательной системы (кривая 3) в виде частотной зависимости тока механической ветви (ток, потребляемый излучателем за вычетом тока обусловленного статической емкостью пьезокерамических элементов излучателя), реальная фазочастотная характеристика колебательной системы, как механической колебательной системы (кривая 1) и фазочастотные характеристики, полученные путем измерения сдвига фаз между током и напряжением на пьезокерамических элементах излучателя, полученные при различных значениях статической емкости пьезопреобразователя (кривые 2).

Данные кривые получены с использованием эквивалентной электрической модели ультразвукового излучателя (см. рис. 4) с резонансной частотой 22 кГц. Эти зависимости приводятся в качестве примера для иллюстрации влияния электрической емкости пьезокерамических элементов на частотную зависимость сдвига фаз φ между током и напряжением на пьезоэлементах излучателя (кривые 2).

Из представленных зависимостей следует, что изменение электрической емкости пьезокерамических элементов из-за их разогрева в процессе работы излучателя приводит к тому, что система АПЧ существующих УЗ генераторов, устремляя фазовый

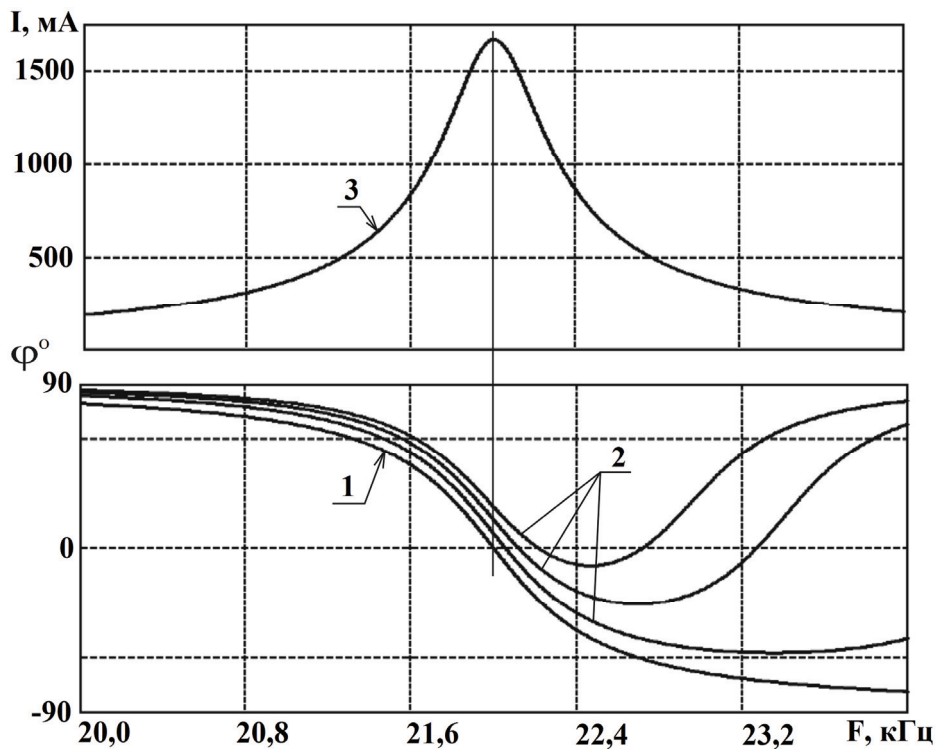


Рис. 3. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики в зависимости от изменения электрической емкости пьезокерамических элементов

сдвиг φ между током и напряжением на пьезокерамических элементах излучателя к нулю, заставляет работать УЗ электронный генератор на частоте, не соответствующей резонансной частоте УЗ колебательной системы, а немного выше (кривые 2, на рисунке 3, пересекают ось частоты в точках расположенных правее относительно точки, соответствующей максимуму на кривой 3).

Как было отмечено ранее, работа УЗ колебательной системы в газовых средах сопровождается сильным нагревом элементов ее конструкции, что приводит не только к уменьшению резонансной частоты, но и увеличению в 1,5...2 раза электрической емкости пьезокерамических элементов. При высокой добротности системы, из-за ошибок в работе системы АПЧ (обусловленных влиянием емкости пьезокерамических элементов), снижается интенсивность ультразвукового воздействия и эффективность реализуемых процессов.

Для исключения влияния электрической емкости пьезоэлементов на частотное согласование электронного генератора с УЗ колебательной системой предложена и разработана схема выделения тока механической ветви, фазочастотная характеристика которого повторяет фазочастотную характеристику излучателя как механической колебательной системы и не зависит от электрической емкости пьезокерамических элементов излучателя. Сущность такого подхода поясняется далее.

На рис. 4 представлена эквивалентная электрическая схема УЗ излучателя, описывающая его работу вблизи частоты механического резонанса.

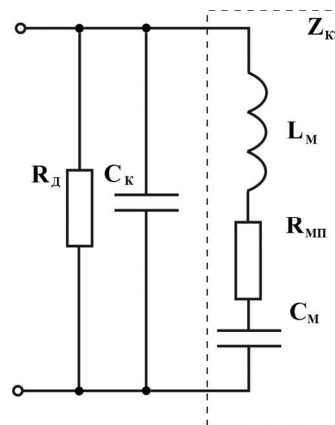


Рис. 4. Схема замещения УЗ излучателя с пьезоэлектрическим преобразователем

В этой схеме индуктивность L_m — эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m — упругости материала системы; активное сопротивление $R_{мп}$ — сопротивлению механических потерь, C_k — электрической емкости пьезокерамических элементов, R_d — диэлектрическим потерям. Элементы L_m , C_m , $R_{мп}$ образуют так называемую механическую ветвь эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы с комплексным сопротивлением $Z_{кэ}$.

Ток, протекающий по элементам L_m , C_m , $R_{мп}$, является током механической ветви, частотная характеристика которого (амплитудная и фазовая) полностью повторяет частотную характеристику

УЗ излучателя, если его рассматривать как механическую колебательную систему. Таким образом, новым критерием настройки электронного генератора на резонансную частоту колебательной системы является стремление к нулю сдвига фаз между напряжением на пьезокерамических элементах излучателя и током его механической ветви.

При ультразвуковом воздействии на газовые среды параметры излучателей, такие как добротность, резонансная частота, амплитуда колебаний не меняются, в отличие, например, от жидких сред, волновое сопротивление которых на порядки изменяется при наложении УЗ полей высокой интенсивности, что приводит к динамическим изменениям параметров излучателей. Единственный фактор, определяющий изменение резонансной частоты излучателя, работающего в газовой среде, является разогрев его конструкции. Скорость изменения резонансной частоты излучателя составляет, примерно 5 Гц/с. В таком случае требования к быстродействию системы АПЧ генератора могут быть существенно снижены (при этом снижается уровень частотной модуляции).

Предложенные новые технические решения реализованы при создании электронных генераторов, работающих в составе ультразвуковых установок, предназначенных для создания мощных акустических полей в газовых средах.

При мощности УЗ генератора 300 Вт и диаметре излучающего диска 350 мм получены ультразвуковые колебания с интенсивностью до 165 дБ. Уровень амплитудной модуляции тока в цепи питания излучателя не превышает 5 %, в то время как при работе существующих систем АПЧ (при работе с излучателями, добротность которых достигает 1000) уровень амплитудной модуляции доходит до 70 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалун А.В. Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. – Алтайский гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
2. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. – Т. III. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 688 с.
3. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. 1982. – 208 с.
4. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Shalunov A.V., Lebdev A.N., Galahov A.N., Shalunova K.V. Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conf. Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 250–253.

Практические результаты по коагуляции туманов [5], твердых частиц в воздухе, гашению пены в процессе розлива пива [6], сушке продуктов [7] подтвердили высокую эффективность разработанных электронных генераторов.

Выводы

1. Рассмотрены вопросы проектирования и эксплуатации электронных генераторов для ультразвуковой интенсификации процессов в газовых средах.
2. Сформулированы общие требования к электронным генераторам и предложены новые подходы и схемные решения непрерывного контроля параметров системы и установления оптимальных режимов работы электронного генератора.
3. Разработан ультразвуковой генератор с техническими характеристиками:
 - добротность подключаемого пьезоэлектрического преобразователя 1000...1200;
 - шаг перестройки по частоте 2 Гц;
 - обеспечиваемый уровень звукового давления (при потребляемой электрической мощности 300 Вт) 165 дБ;
 - диапазон сканирования частоты 2 кГц;
 - амплитудная модуляция тока в цепи питания излучателя не более 5 %;
4. Результаты исследований реализованы в практических конструкциях ультразвуковых акустических установок.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и Совета по грантам Президента Российской Федерации.

5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V. Development and investigation of the ultrasonic coagulation tank // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conf. Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 271–274.
6. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Khmelev M.V. Ultrasonic device for foam destruction. – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2007: Conf. Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 252–254.
7. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Abramenko D.S., Genne D.V. Research and Development of Ultrasonic Device Prototype for Intensification of Drying Process. – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2008: Conf. Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P. 235–240.

Поступила 03.03.2010 г.