

Адаптивная Система ФАПЧ Ультразвуковых Электронных Генераторов

Хмелев В.Н., к.т.н., *Senior Member, IEEE*, Барсуков Р.В., к.т.н., Цыганок С.Н., к.т.н., Хмелев М.В., *Member, IEEE*

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

Аннотация – Совершенствование систем автоматической настройки частоты электронных УЗ генераторов на резонансную частоту ультразвуковых колебательных систем для стабильной работы ультразвуковых аппаратов в широком диапазоне нагрузок и мощностей является актуальной задачей. В статье представлен способ удержания резонансного режима работы ультразвуковых колебательных систем, позволяющий расширить функциональные возможности существующего ультразвукового оборудования.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целесообразность использования ультразвуковой энергии для интенсификации различных физико-химических процессов подтверждена многолетним опытом применения ультразвукового (УЗ) оборудования в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, медицины, в быту.

Не смотря на все многообразие существующего ультразвукового оборудования, мощность которого лежит в пределах от единиц ватт до десятков киловатт, все они построены по одним и тем же функциональным схемам [1].

Электронный ультразвуковой генератор преобразует энергию бытовой или промышленной электрической сети в электрическую энергию ультразвуковой частоты, которая затем поступает на пьезоэлектрический или магнитострикционный преобразователь ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). Ультразвуковая колебательная система, находясь в непосредственном контакте с обрабатываемой средой, осуществляет ввод в нее ультразвуковой энергии.

Как правило, ультразвуковые колебательные системы являются резонансными системами с собственной резонансной частотой и определенной добротностью. Эти два основных параметра, характеризующих ультразвуковую колебательную систему, в процессе воздействия на технологическую среду могут изменяться, поскольку могут изменяться свойства обрабатываемых сред в зоне их непосредственного контакта с излучающей поверхностью колебательной системы.

Следовательно, ультразвуковой электронный генератор должен не только осуществлять преобразование электрической энергии, но и компенсировать изменения параметров колебательных систем в процессе ультразвукового воздействия на технологические среды.

В связи с этим все современные ультразвуковые электронные генераторы снабжены системами управления мощностью УЗ излучения и системами автоматической подстройки частоты (АПЧ) для обеспечения резонансного режима работы УЗКС. Особое внимание уделяется надежности работы систем АПЧ, поскольку колебательные системы в основном являются высокочастотными системами и небольшое частотное рассогласование УЗКС и ультразвукового генератора приводит к резкому снижению эффективности ультразвукового воздействия, а так же снижению КПД ультразвукового аппарата в целом [2]. Далее кратко рассмотрены существующие способы настройки УЗ генераторов на резонансную частоту ультразвуковых колебательных систем и предлагается к рассмотрению один из способов настройки электронного генератора на резонансную частоту ультразвуковой колебательной системы.

II. ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Для настройки ультразвукового генератора на резонансную частоту колебательной системы современные системы АПЧ используют сигналы обратной связи, которые содержат в себе информацию о режиме работы УЗКС. Сигналы обратной связи можно получить либо при помощи специальных датчиков, прикрепленных непосредственно к активным элементам конструкции колебательной системы (измерения на механической стороне), либо при помощи датчиков, включенных в электрические цепи питания колебательной системы (измерения на электрической стороне). Измерения на механической стороне, например при помощи тензо- или пьезо- датчиков, позволяют получить наиболее полную и точную информацию о режимах работы колебательных систем. Однако надежность такого способа получения сигнала

обратной связи невысока, поскольку существует вероятность выхода из строя (разрушение, отклеивание и т.п.) датчиков, смонтированных на вибрирующие поверхности элементов колебательных систем. Ситуация усугубляется в мощных ультразвуковых установках, где кроме высоких уровней вибраций, температура в зоне размещения датчиков может достигать сотен градусов по Цельсию.

В связи с этим широкое распространение получили способы, основанные на контроле электрических параметров сигналов в силовых цепях питания УЗКС (амплитуды токов и напряжений, фазовые соотношения между ними и т.д.). Современные системы автоматической подстройки частоты ультразвуковых генераторов используют фазовые детекторы, для выделения сигнала, пропорционального фазовому соотношению напряжения на колебательной системе и тока потребляемого колебательной системой [3]. Считается, что равенство нулю сдвига фазы между током и напряжением, является условием резонансного режима работы колебательной системы.

На рисунке 1 представлена типовая структурная схема ультразвукового технологического аппарата. Сигнал обратной связи F1 вырабатывается токовым датчиком, включенным непосредственно в цепь питания колебательной системы. В качестве опорного сигнала используется сигнал F2, который снимается с выхода электронного генератора.

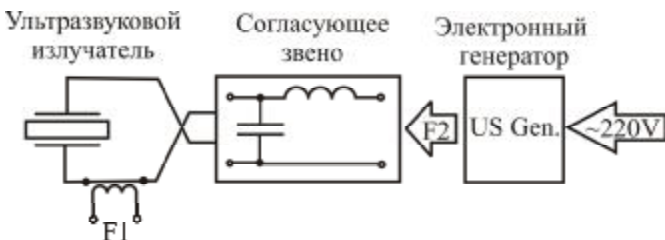


Рисунок 1 - Структура ультразвукового технологического аппарата

Однако, как показывает практика, не во всех случаях реализуется равенство нулю фазовое соотношение сигналов F1 и F2. Это происходит в следующих случаях:

1. небольшие мощности излучения;
2. большие акустические нагрузки;
3. большая статическая емкость пьезоэлектрических преобразователей (в некоторых случаях используются пакетные преобразователи, собранные из множества отдельных пьезоэлементов);
4. конструктивные особенности ультразвуковых колебательных систем.

Тем не менее, фазочастотная характеристика тока, потребляемого колебательной системой, в любом случае отражает резонансные свойства ультразвуковой колебательной системы и может быть использована для настройки УЗ генератора на резонансную частоту УЗКС.

На рисунке 2 представлена фазочастотная

характеристика тока, потребляемого колебательной системой от электронного УЗ генератора. Вдали от резонансной частоты угол ϕ составляет 90 градусов, что обусловлено статической емкостью пьезопреобразователей, входящих в состав ультразвуковых колебательных систем. По мере приближения к резонансной частоте колебательной системы угол ϕ уменьшается и достигает своего минимального значения ϕ_1 в точке С. При дальнейшем увеличении частоты УЗ генератора происходит скачкообразный «срыв» резонансного режима работы колебательной системы (отрезок CD). Скачкообразный срыв частоты особенно характерен при работе высокочастотных колебательных систем в жидких средах в режиме развитой кавитации и связан с явлением увеличения резонансной частоты УЗКС по мере развития в жидкой среде кавитации.

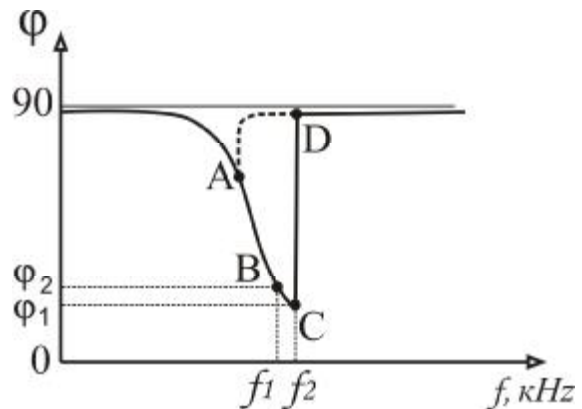


Рисунок 2 – Фазочастотная характеристика тока, потребляемого колебательной системой

Для обеспечения режима работы УЗКС близкого к резонансному, необходимо обеспечить работу УЗ генератора на частоте равной f_2 (точка С). Однако высокая крутизна участка CD (смотри рисунок 2) и нестабильность положения точки С на частотной оси приводит к срыву резонансного режима работы УЗКС. В случае срыва резонансного режима работы УЗКС (точка D), уменьшение частоты УЗ генератора не приводит к его возобновлению. Для того, что бы вновь настроиться на режим, близкий к резонансному, необходимо описать на представленной ФЧХ (смотри рисунок 2) траекторию DABC. То есть, работа системы ФАПЧ в точке С характеризуется высокой нестабильностью и сопровождается постоянными срывами, тем более при нестационарной нагрузке.

Для более стабильной работы УЗ генератора с подобной ФЧХ тока, потребляемого колебательной системой, предложен следующий способ.

1. Осуществляется сканирование частотного диапазона в окрестностях резонансной частоты ультразвуковой колебательной

- системы для нахождения минимального значения – φ_1 .
2. После нахождения минимального значения фазы φ_1 , вычисляется $\varphi_2 = (\varphi_1 + \Delta\varphi)$. Значению фазы φ_2 соответствует значение частоты УЗ генератора равное f_1 .
 3. Осуществляется настройка УЗ генератора на частоту f_1 и реализуется ее удержание следующим образом. Определяется знак выражения $(\varphi - \varphi_2)$. В случае когда $(\varphi - \varphi_2) > 0$ частота УЗ генератора увеличивается, а когда $(\varphi - \varphi_2) < 0$ - уменьшается. Значение $\Delta\varphi$ выбирается таким, чтобы работа системы ФАПЧ была стабильной (на выбор величины $\Delta\varphi$ влияет добротность УЗКС и динамика пульсаций акустического импеданса нагрузки).
 4. Поскольку в процессе ультразвукового воздействия импеданс обрабатываемой среды может изменяться, а так же мощность излучения может подстраиваться оператором, точка С может перемещаться по склону АВ рассматриваемой ФЧХ вверх или вниз. При движении точки С вверх по склону АВ, при удержании работы УЗ генератора в точке В, возможен срыв резонансного режима работы УЗКС при совпадении точек В и С. В этом случае необходимо повторить пункты 1, 2, 3 для нахождения нового значения фазы φ_2 .
 5. В случае движения точки С вниз по склону АВ, что связано с увеличением резонансной частоты УЗКС, происходит большее частотное рассогласование УЗ генератора с резонансной частотой УЗКС. В этом случае так же необходимо выполнить нахождение нового значения φ_2 , выполнив пункты 1, 2, 3.
 6. Инициализация нахождения нового значения φ_2 может осуществляться, например, в фиксированные моменты времени, либо в случае необходимости – в случае срыва резонансного режима работы УЗКС (скачкообразное изменение текущего значения φ).
 7. В процессе работы предлагаемого алгоритма заложена функция непрерывного уменьшения значения величины φ_2 с большой постоянной времени τ . Эта функция введена для постепенного стремления режима работы УЗ аппарата к режиму работы, которому соответствует точка С. В таком случае срыв резонансного режима неизбежен, что требует перезапуска работы системы ФАПЧ (повторение пунктов алгоритма 1, 2, 3). Однако, поскольку величина τ выбирается большой,

то частота следования перезапусков системы ФАПЧ невелика, что обеспечивает относительную стабильность в работе системы ФАПЧ ультразвукового генератора.

Предложенный алгоритм был реализован и интегрирован в существующее УЗ оборудование. На рисунке 3 представлен УЗ аппарат, предназначенный для обработки жидких сред с широким диапазоном акустических нагрузок при температуре обрабатываемых сред до 200 °С. Использование разработанного алгоритма в системе ФАПЧ показало высокую стабильность и устойчивость в работе УЗ аппарата как в средах с различными акустическими свойствами, так и в средах с изменяющимися свойствами, например в кипящей в масле, нагретом до 180 °С, воде.



Рисунок 3 – Ультразвуковой аппарат для обработки жидких сред

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ удержания резонансного режима работы ультразвуковых колебательных систем может быть использован как основной, так и дополнительный режим работы существующих систем ФАПЧ при работе УЗ генераторов в режимах малых мощностей, больших акустических нагрузок, а также при использовании УЗКС с высоким значением статической емкости пьезопреобразователей входящих в ее состав.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Vladimir N. Khmelev, Igor I. Savin, Alexey N. Slivin, Sergey N. Tsyganok, Eugene V. Chipurin Development of Compact Multipurpose Ultrasonic Technological Device // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2003. - P.217-221.
- [2] Vladimir N. Khmelev, Sergey N. Tsyganok, Andrey N. Lebedev Designing and Efficiency Analysis of Half-Wave Piezoelectric Ultrasonic Oscillatory Systems // International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2005. - P.82-85.
- [3] Vladimir N. Khmelev, Alexey N. Slivin, Sergey N. Tchyganok System of Phase-Locked-Loop Frequency Control of Ultrasonic Generators // Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2001. - P.56-57.

Адаптивная Система ФАПЧ Ультразвуковых Электронных Генераторов