

Программная Реализация Способов Управления Различными Режимами Работы Ультразвуковых Генераторов

Роман В. Барсуков, к.т.н., Андрей В. Шалунов, к.т.н.,
Дмитрий В. Генне, *Student Member*, IEEE, Максим В. Хмелёв, *Student Member*, IEEE
Бийский технологический институт (филиал)
ГОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Аннотация – В статье описываются основные режимы работы ультразвуковых электронных генераторов, алгоритмы и способы их реализации.

Ключевые слова – ультразвук, алгоритмы, программа, режимы работы ультразвуковых генераторов, электронный генератор, кавитация, резонансная частота, управляющий микроконтроллер.

I. ВВЕДЕНИЕ

ШИРОКОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ультразвуковых технологий, их применение в сфере потенциально опасных производств и медицине обуславливают высокие требования, предъявляемые к качеству работы ультразвуковых (УЗ) установок. Современные производства, как правило, полностью автоматизированы, поэтому используемые ультразвуковые установки должны быть так же полностью автоматическими.

При кажущейся простоте управления ультразвуковой установкой (работа на рабочей частоте колебательной системы при заданной мощности) существует несколько режимов работы, которые современный электронный генератор должен обеспечивать. Только применение современных микроконтроллеров, позволяет полностью автоматизировать работу ультразвуковой установки.

II. ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетний опыт конструирования ультразвуковых технологических аппаратов, предназначенных для реализации самых разнообразных процессов, показывает, что существует множество тонкостей и особенностей функционирования УЗ аппаратов, при реализации тех или иных технологических процессов. Это накладывает ряд требований к ультразвуковым аппаратам, к режимам их работы.

Все процессы, которые реализуются в ультразвуковых полях высокой интенсивности, сопровождаются изменением свойств обрабатываемых технологических сред, причем характер, величина

и скорость изменения этих параметров могут существенно отличаться друг от друга.

Иными словами, есть режимы работы электронных генераторов, которые присущи только определенным технологическим процессам. По этой причине электронный генератор, который, например, обеспечивает питание УЗКС при реализации УЗ сварки, не будет работать в составе УЗ установки для обработки жидких сред.

Режимы работы, которые обеспечивает электронный генератор, определяются не только реализуемыми процессами и обрабатываемыми средами, но и конструктивными особенностями ультразвуковых колебательных систем, например площадью рабочей поверхности УЗ излучателя, типом преобразователя, видом рабочего инструмента.

В качестве примера, рассмотрим особенность запуска УЗ установки при обработке жидкости в кавитационном режиме. Основная проблема запуска УЗ генератора состоит в том, что при старте аппарата УЗКС работает в некавитирующей среде (режим небольшой стартовой мощности) и имеет одну резонансную частоту, а по мере развития кавитации и выхода на режим развитой кавитации, резонансная частота УЗКС увеличивается. Это связано с изменением свойств жидкой среды по мере развития в ней кавитации [1].

Таким образом, если запускать электронный генератор на частоте равной частоте УЗКС, работающей в кавитирующей среде, аппарат «не запустится». В таком случае режим запуска генератора должен быть таким: на небольшой мощности осуществляется поиск резонансной частоты УЗКС, начиная с минимально возможной частоты диапазона перестройки генератора; после нахождения резонансной частоты включается система удержания резонансного режима работы УЗКС, и плавно увеличивается напряжение питания УЗКС; в процессе увеличения напряжения (мощности), развивается кавитация и происходит увеличение частоты УЗКС; по мере увеличения резонансной частоты УЗКС генера-

тор также подстраивает свою частоту. Это происходит до тех пор, пока не произойдет выход на режим развитой кавитации.

Этот пример доказывает, что при реализации тех или иных процессов необходимо адаптировать электронный генератор под особенности процесса, для реализации специализированных режимов работы электронного генератора.

Описание всех специализированных режимов работы УЗ генераторов не представляется возможным в виду многообразия и индивидуальности этих режимов.

Помимо специальных режимов, существует ряд режимов, которые являются обязательными и одинаковыми для любых типов электронных УЗ генераторов. Эти режимы будут рассмотрены далее более подробно [2].

Для нормального функционирования любой ультразвуковой установки ее электронный генератор должен обеспечивать, как минимум, следующие режимы работы:

- обеспечивать поиск резонансной частоты подключенной к генератору ультразвуковой колебательной системы (УЗКС);
- обеспечивать настройку на резонансную частоту УЗКС;
- обеспечивать равенство частот электронного генератора и собственной частоты УЗКС в процессе работы (резонансный режим работы);
- обеспечивать необходимый уровень тока, протекающего через пьезоэлементы УЗКС;
- обеспечивать стабилизацию тока, протекающего через пьезоэлементы УЗКС, в процессе работы;
- обеспечивать повторные перезапуски электронного генератора в случае возникновения «срывов» резонансного режима работы;
- обрабатывать электрические перегрузки, возникающие в процессе работы.

Как правило, все современные электронные генераторы работают под управлением микроконтроллеров, на базе которых и реализуются выше перечисленные режимы работы. Таким образом, от качества программного обеспечения ультразвуковых генераторов зависит качество и эффективность работы ультразвуковой аппаратуры в целом. Алгоритмы, реализуемые в виде программы для микроконтроллера, строятся на базе знаний о функциональных возможностях электронной части УЗ генератора, свойствах и особенностях работы УЗКС, требований к реализуемому технологическому процессу, с учетом влияния свойств озвучиваемых сред на параметры УЗКС, и т.п.. Только при наличии полной информацией об объекте управления, которым является взаимосвязанная система «генератор-УЗКС-обрабатываемая среда» [3], возможно реа-

лизовать устойчивый и надежный алгоритм управления ультразвуковой установкой.

Для реализации алгоритмов управления используются современные микроконтроллеры [4], которые способны осуществлять сбор и обработку как цифровых, так и аналоговых сигналов.

1. Алгоритм поиска резонансной частоты УЗКС

Поскольку большинство УЗКС являются резонансными, то непосредственно перед запуском ультразвуковой установки выполняется процедура поиска резонансной частоты УЗКС. Процедура поиска резонансной частоты основана на поиске экстремума (максимума) на АЧХ тока, протекающего через пьезоэлементы УЗКС, в окрестностях ее резонансной частоты, как показано на Рис. 1. Для этого управляющий микроконтроллер с некоторой постоянной скоростью увеличивает частоту задающего генератора, начиная с минимальной частоты f_1 до частоты f_2 . В процессе перестройки частоты генератора непрерывно осуществляется измерение текущей частоты задающего генератора, амплитуды тока УЗКС и реализуется алгоритм поиска максимума на его частотной характеристике.

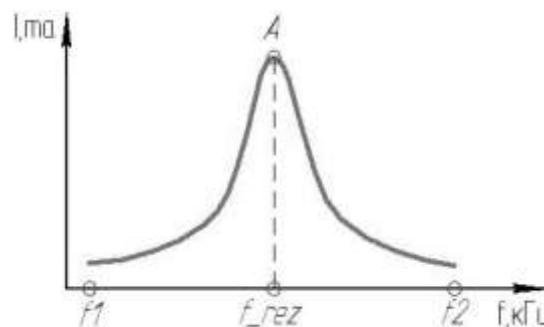


Рис. 1 АЧХ тока, протекающего через пьезоэлементы УЗКС

В ходе сканирования частотного диапазона и работы алгоритма поиска максимума определяется значение частоты f_{rez} , которое соответствует точке A (смотри Рис. 1). При достижении верхней частоты диапазона сканирования, осуществляется настройка задающего генератора на частоту f_{rez} . Процесс поиска и настройки на резонансную частоту УЗКС считается завершенным.

В процессе поиска резонансной частоты УЗКС важным параметром является уровень напряжения на выходе электронного генератора U_{find} , при котором осуществляется поиск. Правильно выбранное значение U_{find} гарантирует нахождение резонансной частоты соответствующей процедурой. На Рис. 2 показаны АЧХ тока, полученные при различных значениях U_{find} .

В случае малого значения U_{find} , АЧХ тока, протекающего через пьезоэлементы УЗКС, не имеет ярко выраженного максимума и есть большая вероятность ошибочного определения резонансной частоты УЗКС (кривая 3, Рис. 2).

В случае большого значения U_{find} , кривая частотной характеристики тока может пересечь предельно допустимый уровень I_{max} . Это приводит к усечению (искажению) АЧХ тока и неверному определению резонансной частоты УЗКС (кривая 1, Рис. 2). Кроме того, если допустить поиск резонансной частоты при больших значениях U_{find} , это может привести к чрезмерным амплитудам механических колебаний УЗКС и ее разрушению. Таким образом, если в процессе поиска резонансной частоты величина тока достигает значения I_{max} , процесс поиска останавливается на частоте f_s и затем возобновляется вновь при $U_{find}=U_{find} - dU$, где dU – шаг уменьшения напряжения поиска резонансной частоты.

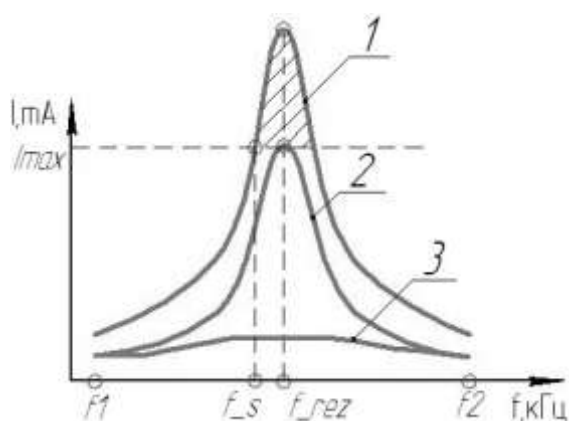


Рис. 2 Семейство АЧХ тока УЗКС, полученные при различных значениях U_{find}

Повторные попытки поиска резонансной частоты, с уменьшением параметра U_{find} , продолжается до тех пор, пока максимум на частотной характеристике тока окажется ниже уровня I_{max} (кривая 2, Рис. 2).

После того, как была найдена резонансная частота УЗКС, осуществляется настройка задающего генератора на эту частоту. Далее представлен возможный вариант программы, написанный на языке программирования С для микроконтроллеров [5], реализующий настройку электронного генератора на резонансную частоту УЗКС, где $RezFreq$ – резонансная частота УЗКС, $Frequency$ – текущая частота задающего генератора, $Step_Up()$ и $Step_Down()$ – процедуры, реализующие дискретную перестройку задающего генератора вверх или вниз по частоте соответственно.

```
void TuneOnWorkFreq(unsigned int RezFreq)
{ do{ if (Frequency< RezFreq) Step_Up();
      if (Frequency> RezFreq) Step_Down();
      if (((RezFreq -10)> Frequency)&&(Frequency>
          (RezFreq +10))) return;
    }while(1); }
```

2. Алгоритм удержания резонансного режима работы УЗКС

После того, как произошла настройка задающего генератора на резонансную частоту УЗКС, начинает работать алгоритм удержания резонансного режима работы. Наиболее часто используемым критерием настройки электронного генератора на рабочую частоту УЗКС является равенство нулю сдвига фаз между током и напряжением на пьезоэлементах УЗКС (точка А, Рис. 3).

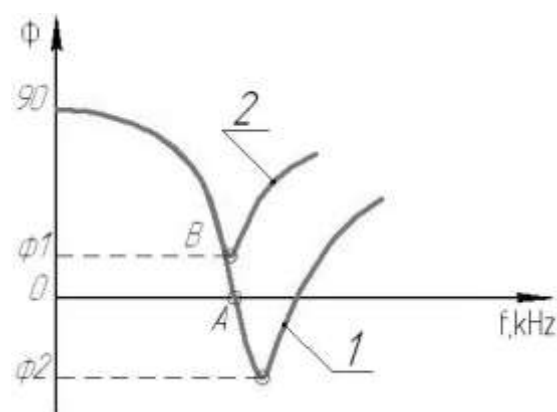


Рис. 3. Сдвиг фаз между током и напряжением на элементах УЗКС

В зависимости от знака фазового сдвига φ осуществляется перестройка задающего генератора вверх или вниз по частоте. Таким образом, происходит непрерывная подстройка частоты электронного генератора. В зависимости от параметров используемых колебательных систем, динамики изменения свойств обрабатываемых технологических сред, точка А (Рис. 3) может смещаться влево - вправо, относительно первоначального положения. В случае недостаточной скорости работы алгоритма фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) может произойти «срыв» (потеря) резонансного режима работы УЗКС.

Описанный выше алгоритм работы ФАПЧ работает только в случае, когда есть пересечение фазочастотной характеристикой оси абсцисс (кривая 1, Рис. 3). Однако, в режиме малых мощностей или в случае сильного демпфирования УЗКС акустической нагрузкой, происходит увеличение угла $\varphi 2$, который характеризует заход фазочастотной характеристики в область отрица-

тельных значений. В случае, когда угол φ 2 становится положительным, описанный выше алгоритм ФАПЧ перестает работать.

В случае положительных значений угла φ 2, фазочастотная характеристика имеет вид как показано на Рис. 3 (кривая 2). В этом случае критерием работы в режиме близком к резонансному может считаться работа в точке минимума на частотной характеристике (точка В, Рис. 3). Однако в этом случае качество работы ФАПЧ снижается, так как точка В, в процессе УЗ воздействия, может смещаться по двум координатным осям. Ситуация усугубляется в случае обостренных частотных характеристик УЗКС.

3. Алгоритмы определения «срыва» резонансного режима работы.

Наличие систем определения «срывов» резонансного режима работы электронных генераторов позволяет в случае возникновения таких ситуаций осуществлять повторные перезапуски генератора. Это имеет большое значение при реализации длительных процессов ультразвукового воздействия (экстракция, мойка, прошивка и т.п.), и не имеет никакого значения при реализации быстротекающих процессов – например ультразвуковая сварка, которая длится доли секунд. Как правило, в случае «срыва» резонансного режима работы электронного генератора, при работе алгоритма ФАПЧ происходит «ошибочная» перестройка частоты вверх или вниз частотного диапазона. Наиболее простым и очевидным решением задачи связанной с определением «срыва» резонансного режима работы является контроль текущей частоты и в случае ее выхода за диапазон перестройки генератора фиксируется событие «срыв частоты». Далее представлен возможный вариант программы, реализующий контроль выхода значения частоты задающего генератора за границы определенного диапазона, где Frequency – текущая частота задающего генератора, FrequencyTune() – процедура, реализующая алгоритм ФАПЧ, FreqMax и FreqMin – границы контролируемого частотного диапазона, FreqLost() – процедура отработки события «срыв частоты».

```
do {
    FrequencyTune();
    if (Frequency>FreqMax) FreqLost();
    if (Frequency<FreqMin) FreqLost();
}while(1);
```

Однако в случае потери основного резонанса система ФАПЧ может осуществить «захват» другого резонанса (если таковой имеется) оставаясь при этом в диапазоне полосы перестройки

частоты генератора. В таком случае, для определения «срыва» резонансного режима работы генератора может быть использован следующий алгоритм.

Поскольку в процессе работы алгоритма ФАПЧ, в случае резонансного режима работы, угол φ постоянно меняет свой знак, за критерий резонансного режима работы можно принять определенную интенсивность смены знака угла φ в единицу времени. Таким образом, в случае если знак угла φ сохраняется постоянным, в течение определенного времени, фиксируется событие «срыв резонансного режима работы».

Далее представлен возможный вариант программы, реализующий этот алгоритм, где: F_i – угол сдвига между током и напряжением на УЗКС, Step_Up() и Step_Down() – процедуры, реализующие дискретную перестройку задающего генератора вверх или вниз по частоте соответственно, OverTime – константа, определяющая момент принятия решения о возможном «срыве» резонансного режима работы, FreqLost() – процедура отработки события «срыв частоты».

```
PLLFcounter1=0;
PLLFcounter2=0;
do{   if (Fi>0) {PLLFcounter2 = 0; Step_Up;
        PLLFcounter1++;}
      if (Fi<0) {PLLFcounter1 = 0;
        Step_Down; PLLFcounter2++;}
      if ((PLLFcounter1>OverTime)||
        PLLFcounter2> OverTime)) FreqLost();
}while(1);
```

В случае фиксирования события «срыв резонансной частоты» осуществляется кратковременное отключение ультразвукового генератора и далее происходит его повторный перезапуск.

Частота возникновения «срывов» резонансного режима работы генераторов и причины таких могут быть различными.

Потеря генератором резонансной частоты УЗКС может быть следствием случайных единичных событий. В таких случаях процедура перезапуска электронного генератора выполняется крайне редко.

Потеря генератором резонансной частоты УЗКС может быть следствием изменения условий ультразвукового воздействия на технологическую среду (не соответствующая акустическая нагрузка). В таком случае возникают непрерывные перезапуски электронного генератора, которые следуют один за другим. Непрерывные перезапуски электронного генератора так же возможны в случае механического разрушения УЗКС.

Для исключения многократных перезапусков электронного генератора введен режим контроля интенсивности перезапусков электронного гене-

ратора. Таким образом, если число перезапусков электронного генератора в единицу времени превышает определенное значение, электронный генератор полностью отключается.

Кроме обеспечения надежного запуска и удержания резонансного режима работы электронного генератора, управляющий микроконтроллер осуществляет непрерывный контроль и управление энергетическими параметрами УЗ установки (потребляемая мощность и амплитуда механических колебаний УЗКС).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительной особенностью современных электронных УЗ генераторов является наличие управляющего микроконтроллера, который работает под управлением специальной программы. При таком подходе у разработчиков УЗ оборудования появляется возможность без усложнения электронной «начинки» генератора дополнять его новыми функциональными возможностями, совершенствовать уже существующие алгоритмы управления. Использование языков высокого уровня для написания управляющих программ, позволяет сделать этот процесс более оперативным.

И в заключение следует сказать, что большинство управляющих алгоритмов реализуются параллельно. В таком случае требуется грамотное распределение вычислительных ресурсов микроконтроллера, для реализации тех или иных режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В., Цыганок С.Н. Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе ультразвукового воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды/ Электронный журнал «Исследовано в России». - 2005. - 135. - С.1359-1367. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/135.pdf>
- [2] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Шалунов А.В. Управление работой электронного генератора при ультразвуковом воздействии на кавитирующие технологические среды/ Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника». Выпуск 2. - Тула: ТулГУ, 2004. - С.32-40.
- [3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Khmelev M.V. Matching Speciality of Electronic Ultrasonic Generators with Piezoelectric Oscillatory Systems/ International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.255-258.
- [4] Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы/Москва: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 288с.:ил.
- [5] Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров/Киев: «МК-Пресс», 2006. – 400с., ил.