

Электрическое согласование в ультразвуковых аппаратах для повышения эффективности ультразвуковых технологий

В.Н. Хмелев, к.т.н., Senior Member IEEE, И.И. Савин

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

Статья представляет результаты исследований, являющиеся продолжением работ, направленных на повышение эффективности ультразвуковых технологий за счет улучшения условий передачи энергии на участке электронный генератор – ультразвуковая колебательная система в ультразвуковом технологическом аппарате.

ВВЕДЕНИЕ

ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО достижений современных технологий связано с интенсификацией физико-химических процессов за счет ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Особенно эффективным является применение ультразвуковых колебаний для интенсификации широко распространенных процессов в технологиях химических, фармакологических и пищевых производств: экстракция, эмульгирование, диспергирование, пропитка, мойка и очистка, сушка. Перечисленные процессы осуществляются за счет действия кавитации, возникающей в жидкости при распространении высокоинтенсивной акустической волны.

Для создания в жидких средах кавитации необходимо осуществлять ввод акустических колебаний с интенсивностью от 2 до 50 Вт/см². Для этих целей создаются специализированные устройства - УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ (далее УЗТА). Ультразвуковой технологический аппарат состоит из следующих узлов: электронного генератора, осуществляющего преобразование энергии электрической сети в энергию электрических колебаний УЗ частоты, и ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), осуществляющей преобразование энергии электрических колебаний УЗ частоты в упругие механические колебания (за счет пьезоэлектрического эффекта), их трансформацию и ввод в обрабатываемую среду. Эффективность протекания технологического процесса, в основном, определяется мощностью акустических колебаний, вводимых ультразвуковым технологическим аппаратом в среду (выходная акустическая мощность).

Для обеспечения ввода максимальной энергии акустических колебаний в технологическую среду, при минимальных потерях энергии в самом УЗТА необходимо

обеспечить наиболее оптимальный режим передачи энергии на участках ЭГ – УЗКС и УЗКС – технологическая среда, что достигается при выполнении условий оптимального согласования выходных сопротивлений источников колебаний (электрических или акустических) и нагрузок.

Акустическое сопротивление технологической среды непостоянно, а подвержено неизбежным изменениям в процессе осуществления технологического воздействия, что связано с изменением свойств среды, таких как волновое сопротивление, вязкость, индекс кавитации и других. Следовательно, резонансная частота УЗКС при будет также подвержена изменениям, и, для обеспечения оптимального акустического согласования необходимо корректировать частоту напряжения, питающего УЗКС. В УЗТА с автоматической подстройкой частоты эта проблема решена. Однако, при этом не учитывается важная особенность УЗКС, которая заключается в том, что пьезоэлектрический преобразователь трансформирует акустические параметры УЗКС и технологической среды в электрические параметры, приведенные к входу УЗКС. То есть, входное электрическое сопротивление УЗКС и ее резонансная частота также являются функцией свойств обрабатываемой среды. Это особенность является существенной при решении вопроса согласования ЭГ с электрическим входом УЗКС.

Применяемые в настоящее время устройства электрического согласования ЭГ и УЗКС представляют собой реактивные четырехполюсники с фиксированными параметрами, что определяет невозможность обеспечения оптимального режима электрического согласования при изменении акустических свойств среды в широком диапазоне.

Указанная особенность реализации УЗТА обуславливает их общий недостаток – снижение выходной мощности и эффективности работы в процессе воздействия на обрабатываемую среду. Одновременно со снижением выходной мощности увеличивается тепловыделение на элементах УЗТА и уровень электромагнитных помех, создаваемых им. В связи с этим дальнейшее развитие УЗТА за счет независимого совершенствования ЭГ и

УЗКС, без учета их взаимодействия следует признать нецелесообразным, а вопрос решение проблемы оптимизации электрического согласования актуальным.

Авторами были опубликованы несколько работ, посвященных путям решения обозначенной проблемы [1,2]. В настоящей статье, являющейся продолжением начатых работ приводится усовершенствованный вариант расчетной модели УЗКС и результаты исследований практической реализации предложенного ранее способа управления.

1. Усовершенствование расчетной модели УЗКС

Использованная в работе [1] расчетная модель УЗКС не позволяет установить численную взаимосвязь между свойствами обрабатываемой среды и входными электрическими характеристиками УЗКС. Однако, на настоящем этапе работ такая необходимость возникла, в связи с чем была разработана уточненная расчетная модель, устанавливающая эту взаимосвязь.

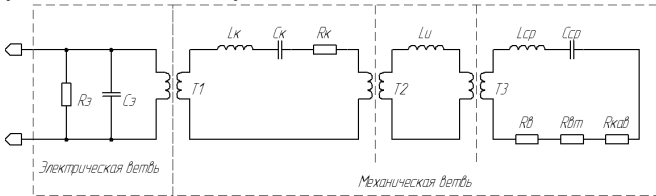


Рисунок 1. Эквивалентная схема замещения УЗКС

Эквивалентная схема состоит из двух параллельно включенных ветвей: «электрической ветви» и «механической ветви». В состав «электрической ветви» входят чисто электрические элементы: собственная электрическая емкость пьезоэлектрического преобразователя C_3 и сопротивление его диэлектрических потерь R_3 .

«Механическая ветвь» представлена элементами, являющимися электрическими аналогиями механических величин. Здесь индуктивности являются эквивалентами колеблющихся масс, емкости – гибкостей, электрические сопротивления – акустических сопротивлений и сил трения. Элементы с индексами «к» относятся к несменным частям УЗКС, элементы с индексами «и», к сменному излучателю, элементы с индексами «ср» - к среде. Активное сопротивление среды складывается из трех компонентов: сопротивление излучения, равное волновому сопротивлению среды R_B , сопротивление вязкого трения излучателя в среде R_{BT} и сопротивление - эквивалент затрат энергии на развитие и поддержание в среде режима кавитации $R_{кав}$.

Идеальный трансформатор $T1$ – эквивалент пьезоэлектрического преобразователя, служит для пересчета механических величин в электрические и обратно. Идеальный трансформатор $T2$ – эквивалент концентратора, идеальный трансформатор $T3$ – эквивалент участка перехода «УЗКС – обрабатываемая среда».

Коэффициент трансформации идеального трансфор-

матора $T1$ есть отношение значения электрического напряжения, приложенного к обкладкам жестко заземленного пьезоэлектрического преобразователя, к значению силы, развиваемой пьезоэлектрическим преобразователем под действием этого напряжения, и определяется выражением:

$$K_1 = \frac{d_{31} \cdot s_{33} \cdot S_1}{H_1}, \quad (1)$$

где d_{33} - пьезомодуль, Кл/Н; s_{33} - модуль упругости пьезоэлектрика, Па; S_1 - площадь поперечного сечения пакета пьезоэлектрических элементов, m^2 ; H_1 - общая толщина пакета пьезоэлектрических элементов, м.

Такое замещение позволяет численно приравнять значения эквивалентных электрических и механических величин «механической ветви».

Коэффициент трансформации идеального трансформатора $T2$, при использовании ступенчато-радиального концентратора определяется выражением.

$$K_2 = (S_1 / S_2)^2 \cdot J \quad (2)$$

где S_2 - площадь выходного торца концентратора, m^2 ; $J = 0,8..0,9$ - коэффициент, учитывающий особенности формы концентратора.

$$K_3 = S_3 / S_2 \quad (3)$$

где S_3 - площадь излучения, m^2 .

В связи с тем, что при обработке жидких сред $wL_{cp} \gg 1/wC_{cp}$, где w - циклическая частота напряжения, питающего УЗКС, элемент C_{cp} из дальнейших расчетов может быть исключен.

Активная составляющая входного сопротивления «механической ветви» определяется выражением

$$R_M = \frac{1}{K_1^2} \left(R_K + \frac{1}{K_2^2} \left(R_{II} + \frac{1}{K_3^2} (R_B + R_{BT} + R_{КАВ}) \right) \right) \quad (4)$$

Сопротивление R_B связано с волновым сопротивлением среды и площадью излучения выражением:

$$R_B = r_{cp} c_{cp} \cdot S_3 \quad (5)$$

где r_{cp} - плотность среды, c_{cp} - скорость звука в среде.

Значение эквивалентного сопротивления вязкого трения R_{BT} определяется как отношение силы вязкого трения к колебательной скорости $R_{BT} = F_{BT} / v$ и, строго говоря, переменна во времени и нелинейна. Но, со вполне допустимой точностью его можно заменить постоянной величиной, равной отношению действующей за период колебаний силы вязкого трения к действующей за период колебательной скорости. Так как действие вязкого трения происходит только половину периода колебаний, величина сопротивления вязкого трения определяется как $R_{BT} = 1/2 F_{BT} / V$.

Определение сопротивления вязкого трения произво-

дится решением задачи о движении в вязкой жидкости тела, совпадающего по форме с излучающей поверхностью, при скорости, равной действующему за период значению колебательной скорости.

Индуктивность и емкость, являющиеся эквивалентами массы и гибкости несменных частей УЗКС определяются выражениями:

$$L_K = r_K \cdot c_K \cdot S / 2pf_0, \quad (6)$$

$$C_K = 1/2pf_0 (r_K \cdot c_K \cdot S_1), \quad (7)$$

где f_0 - резонансная частота ультразвуковой колебательной системы без излучателя, Гц; r_K - усредненная плотность материала колебательной системы, кг/м³; скорость звука в материале колебательной системы, м/с.

Параметр L_H численно равен массе излучателя.

Параметр L_{CP} при работе в докавитационном режиме может быть приближенно оценен как масса цилиндрического участка жидкости диаметром, равным диаметру излучателя и длиной в пределах от половины до одной длины волны:

$$L_{CP} = \frac{R_B}{l_s \cdot f}, \quad (8)$$

где $l_s = 1..2$, f - рабочая частота, Гц.

В режиме кавитации индуктивная компонента сопротивления среды уменьшается практически до нуля.

Индуктивная компонента входного электрического сопротивления «механической ветви» определяется как:

$$L_M = \frac{1}{K_1^2} \left(L_K + \frac{1}{K_2^2} \left(L_H + \frac{1}{K_3^2} L_{CP} \right) \right). \quad (9)$$

Емкостная компонента входного электрического сопротивления определяется выражением:

$$C_M = \frac{1}{K_1^2} C_K. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что для современных пьезоэлектрических материалов $R_Э \gg 1/\omega C_Э$, общее входное сопротивление УЗКС при работе ее в режиме механического резонанса определяется как:

$$Z_2 = R_M / (1 + j\omega C_Э R_M). \quad (11)$$

Таким образом, уточненная расчетная модель УЗКС позволила однозначно связать входное электрическое сопротивление УЗКС с такими свойствами обрабатываемой среды как плотность, скорость звука, вязкость. В свою очередь, связь этих свойств с параметрами технологического процесса рассмотрена в работе [3].

Уточнение расчетной модели УЗКС не потребовало внесения существенных изменений в расчетную модель процесса передачи энергии электрических колебаний от ЭГ к УЗКС и влияния входного электрического сопротивления УЗКС на режим ее электрического согласования

с ЭГ, описанную в работах [1,2]. В тоже время уточненная расчетная модель позволила создать методику расчета диапазона необходимого регулирования параметров элементов узла электрического согласования

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ

Способ управления работой УЗТА, обеспечивающий максимальную передачу энергии от ЭГ к УЗКС и далее к обрабатываемой среде в условиях изменения ее свойств, подробно описан в работах [1] и [2].

Суть предложенного способа состоит в том, что в известной схеме ультразвукового технологического аппарата, где заданный режим акустического согласования и передачи акустической энергии от УЗКС к обрабатываемой среде обеспечивается за счет автоматической подстройки частоты выходного напряжения генератора в соответствии с изменениями резонансной частоты УЗКС и стабилизации амплитуды колебательных смещений излучателя, дополнительно осуществляется автоматическое регулирование индуктивности дросселей устройства электрического согласования таким образом, чтобы независимо от входного сопротивления УЗКС обеспечивалась передача энергии электрических колебаний от ЭГ к УЗКС с максимальным коэффициентом мощности.

В настоящей работе приводятся результаты сравнительных испытаний УЗТА классической схемы (без оптимизации электрического согласования на участке ЭГ – УЗКС) и УЗТА, в котором реализован предложенный способ управления.

Целью исследования является подтверждение возможности повышения мощности, вводимой ультразвуковым технологическим аппаратом в обрабатываемую среду.

В ходе эксперимента был осуществлен ряд процессов с модельными технологическими средами. Каждый процесс проводился дважды – сначала без оптимизации электрического согласования, затем – с применением оптимизации.

Было использовано четыре различных среды: эпоксидная смола, дистиллированная вода, водно-масляная смесь (объемная доля масла составляла 25%) и воздух. В процессе обработки водно-масляной смеси происходило образование эмульсии. Воздействие на среды осуществлялось ультразвуковой колебательной системой, выполненной по полуволновой схеме, имеющей пакетный преобразователь, выполненный на основе пьезоэлектрической керамики APC-841 диаметром 38 мм, толщиной 6 мм (2 шт.), ступенчато-радиальный концентратор с диаметром выходного торца 18 мм. При воздействии на воду и водно-масляную смесь применялся пассивный сменный рабочий инструмент диаметром 28 мм, а при воздействии на эпоксидную смолу – сменный рабочий инструмент диаметром 22 мм. Для воздействия на воз-

дух использовался специальный дисковый излучатель активного типа, диаметром 200 мм. При воздействии на воздух контроль температуры среды не проводился. Обработке подвергалось 0,5 кг эпоксидной смолы, 1 л воды и 1 л водно-масляной эмульсии.

В ходе процесса контролировались следующие величины: выходная мощность электронного генератора, температура среды обрабатываемой среды, температура радиаторов транзисторов.

Зависимости выходной мощности электронного генератора от времени в процессе воздействия на различные среды при различных условиях согласования представлены на рисунке 3. Треугольные маркеры соответствуют воздействию на эпоксидную смолу, ромбические – воздействию на воду, квадратные – воздействию на водно-масляную смесь, крестообразные – воздействию на воздух. Штриховые линии соответствуют режиму воздействия без оптимизации, сплошные – при наличии оптимизации

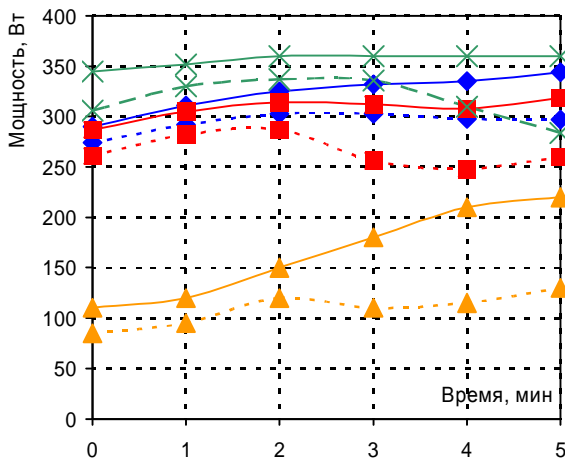


Рисунок 3 - Зависимость выходной мощности электронного генератора от времени в процессе воздействия на различные среды при различных условиях согласования

Графики зависимости температуры радиаторов транзисторов от времени представлены на рисунке 2.

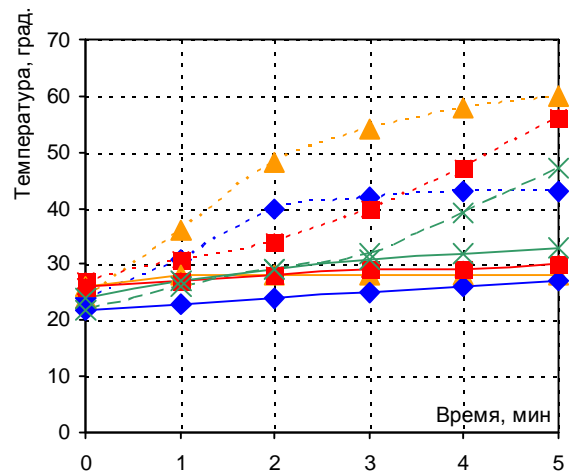


Рисунок 2 - Зависимость температуры выходных транзисторов электронного генератора от времени в процессе воздействия на различные среды при различных условиях согласования

Анализ полученных данных позволяет установить следующее:

1. Мощность, отдаваемая электронным генератором ультразвуковой колебательной системе в режиме оптимизации электрического согласования на участке генератор – электроакустический преобразователь в каждом процессе, оказалось выше, чем при осуществлении того же самого процесса, но без оптимизации согласования.

2. Более быстрый рост температуры транзисторов и большее установившееся значение температуры в режиме воздействия без оптимизации электрического согласования (несмотря на меньшее значение выходной мощности) указывают на меньший к.п.д. преобразования энергии в генераторе по сравнению с режимом оптимизации электрического согласования.

3. При осуществлении ультразвукового воздействия без оптимизации электрического согласования наблюдается максимум выходной мощности, после чего следует спад до промежуточного минимума и очередной рост (кроме случая воздействия на воздушную среду).

4. При воздействии на водно-масляную смесь резкое снижение выходной мощности на третьей минуте воздействия совпадает с моментом активного образования эмульсии. В этот момент акустические свойства существенно изменяются, что вызывает изменение условий электрического согласования и снижения выходной мощности.

6. Изменение выходной мощности в режиме оптимизации электрического согласования обусловлено только изменением свойств обрабатываемой среды, о чем свидетельствует монотонное возрастание выходной мощности при вводе колебаний в эпоксидную смолу и в воду.

7. В проведенных экспериментах оптимизация электрического согласования позволила увеличить мощность, вводимую в эпоксидную смолу на 40%, в воду на

9%, в водно-масляную смесь на 14%, в воздух на 11%.

Таким образом, применение системы оптимизации электрического согласования позволяет увеличить мощность акустического воздействия на среду при одновременном снижении мощности потерь энергии в электронном генераторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований подтверждена возможность и целесообразность повышения эффективности ультразвуковых технологий за счет оптимизации электрического согласования на участке электронный генератор – ультразвуковая колебательная система с использованием ранее разработанного авторами способа управления работой ультразвукового технологического аппарата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Vladimir N. Khmelev, Igor I. Savin, Roman V. Barsukov, Sergey N. Tsyganok, Andrey N. Lebedev, Alexey N. Slivin Developing The Method And Devices For Controlling Of The Working Process In Multifunctional Ultrasonic Apparatus // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2005: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2005.
- [2] В. Н. Хмелев, И.И. Савин Повышение эффективности ультразвукового воздействия на обрабатываемые среды за счет оптимизации электрического согласования в ультразвуковом технологическом аппарате // Электронный журнал «Техническая акустика» 2005, 36.
- [3] Genadiy V. Leonov, Vladimir N. Khmelev, Roman V. Barsukov, Sergey N. Tsyganok, Maxim V. Khmelev Research Changes Electric Parameters of Ultrasonic Oscillatory Systems in Process Ultrasonic Influences on - Liquid Mediums // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2005: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2005.