

В. Н. Хмелев, С. В. Левин, С. С. Хмелёв, С. Н. Цыганок

*Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»,  
e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru)*

## Создание пьезоэлектрических источников ультразвукового воздействия

*Получена 04.03.2013, опубликована 28.03.2013*

В статье предлагаются правила и последовательность проектирования отдельных составляющих (пьезопреобразователей, бустеров, концентраторов и рабочих инструментов) при создании пьезоэлектрических колебательных систем – источников ультразвукового воздействия на различные технологические процессы. Предложенные правила обеспечивают создание ультразвуковых колебательных систем с необходимыми параметрами ультразвукового воздействия: по мощности, интенсивности излучения, частоте, излучающей поверхности, направлению излучения и т. п.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковое технологическое оборудование, ультразвуковая колебательная система, концентратор.

### ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые (УЗ) технологии получают все большее распространение в различных отраслях промышленности, позволяя создавать новые и эффективно интенсифицировать известные технологические процессы [1].

Все известные ультразвуковые технологии реализуются при помощи универсальных или специализированных ультразвуковых технологических аппаратов, в составе которых обязательно присутствуют ультразвуковая колебательная система и ультразвуковой генератор для её питания.

Ультразвуковая колебательная система является основным узлом технологического аппарата, поскольку обеспечивает преобразование электрических колебаний в механические колебания определённой частоты и интенсивности, усиление их амплитуды до значений, способных обеспечить реализацию технологических процессов, введение колебаний в технологические среды через рабочие инструменты, отличающиеся по площади и форме излучающей поверхности.

В зависимости от особенностей реализуемого технологического процесса, объемов обрабатываемых сред возникает необходимость применения УЗ аппаратов различной мощности и комплектации, т.е. в применении определенных колебательных систем и электронных генераторов различной мощности для их питания. При создании и применении электронных генераторов их принято классифицировать по потребляемой электрической мощности [2]. Такая классификация оправдана тем, что, хотя все

генераторы выполняются по близким конструктивным и принципиальным схемам, имеют одинаковые узлы задающих генераторов, систем обратной связи, они существенно отличаются по мощностным, конструктивным и габаритным характеристикам выходных каскадов, источников питания и систем управления выходными каскадами. Поэтому, используемые на практике УЗ аппараты условно делятся на несколько классов по потребляемой электрической мощности генераторов – до 100 Вт, до 400 Вт, до 1000 Вт, до 3000 Вт, до 8000 Вт и более 8000 Вт.

Соответственно, ограничения по излучаемой акустической мощности накладываются на используемые в составе аппаратов ультразвуковые колебательные системы, и в пределах групп колебательных систем одинаковой мощности размеры и конструктивные схемы колебательных систем практически не изменяются.

Однако, кроме мощности излучения, при создании и применении колебательных систем устанавливается значительное число более важных ограничительных параметров – по частоте, интенсивности, вводимой объемной акустической энергии, поверхности и направлении излучения. Эти ограничения определяют конструктивную схему, размер и количество пьезоэлементов в преобразователе, количество полуволновых звеньев, габаритные размеры, форму и размеры инструментов.

Поэтому все используемые на практике ультразвуковые колебательные системы состоят из определённого набора конструктивных элементов, количество, форма и геометрические размеры которых определяются требованиями решаемой технической задачи – необходимостью эффективной реализации определенных технологических процессов. Необходимость обеспечения требуемого УЗ воздействия при реализации процесса с заданной производительностью определяет мощность преобразователя, количество, форму и размеры конструктивных элементов колебательной системы (концентраторов, бустеров, рабочих инструментов), как показано на рис. 1.

## 1. ТЕХНОЛОГИЯ

Поскольку реализация технологических процессов требует определенного энергетического воздействия, определяющим параметром колебательной системы является интенсивность излучения (кавитационное воздействие на жидкие среды) или амплитуда колебаний рабочего инструмента (размерная обработка или сварка термопластичных материалов). При этом необходимо обеспечить определенные условия воздействия (проточная обработка или обработка определённого объёма, величина объемной энергии, равномерность воздействия и т. п.).

Обеспечить необходимое энергетическое воздействия в определенных условиях (объем, вязкость, дисперсный состав обрабатываемого материала, скорость потока, направление и равномерность излучения и т. п.) можно только правильно выбрав пьезоэлектрический преобразователь, концентратор, рабочий инструмент и рационально применив созданную колебательную систему.

Возможность формирования колебаний заданной частоты и мощности определяет выбор пьезоэлектрического преобразователя. Поэтому выбор и проектирование любого источника ультразвукового воздействия – ультразвуковой колебательной системы начинается с создания необходимого и достаточного для обеспечения требуемых параметров пьезоэлектрического преобразователя.

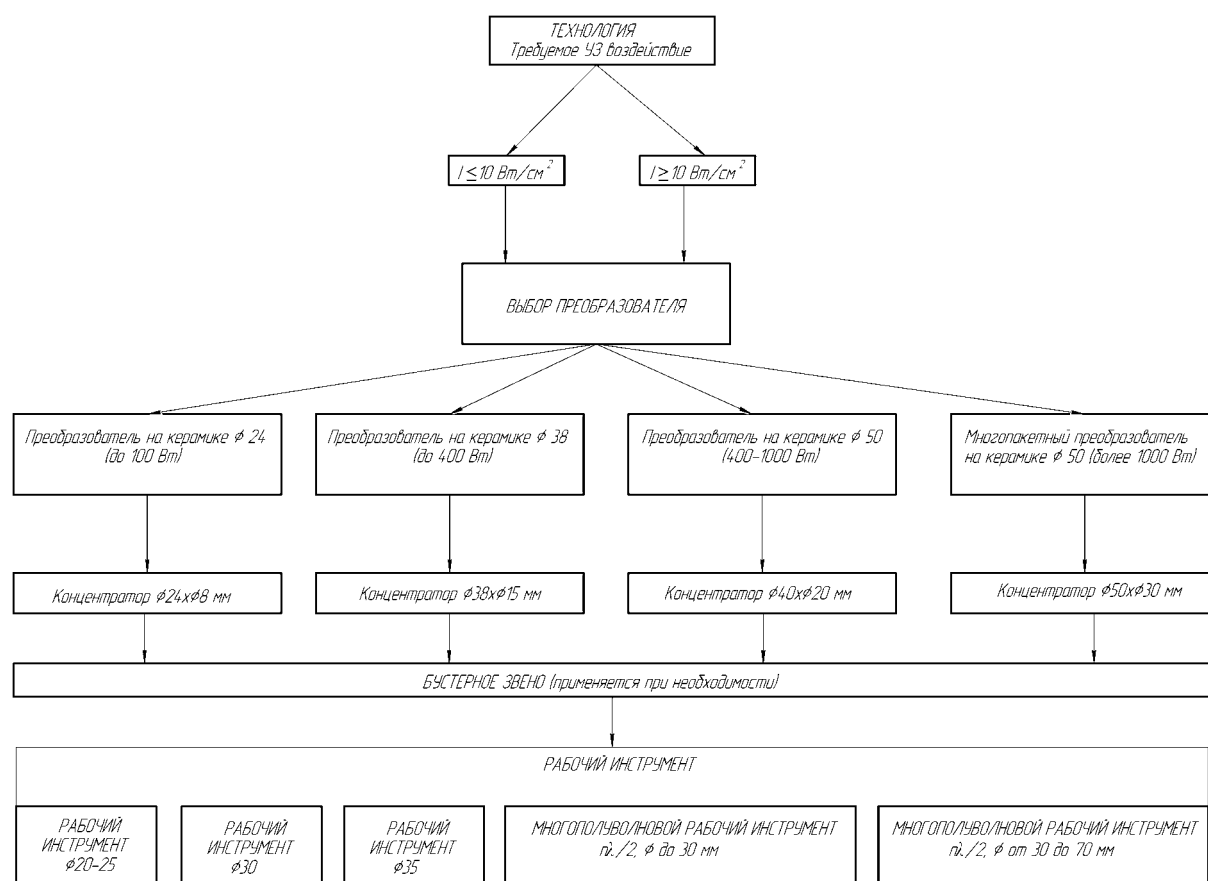


Рис. 1. Схема выбора ультразвуковой колебательной системы

## 2. ВЫБОР ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Пьезоэлектрический преобразователь составляет основу любой ультразвуковой колебательной системы, поскольку именно он обеспечивает преобразование электрической энергии в механические колебания ультразвуковой частоты.

Конструктивно пьезоэлектрический преобразователь состоит из установленных последовательно, механически и акустически связанных между собой металлической частотнопонижающей отражающей накладки, двух пьезоэлектрических элементов, частотнопонижающей рабочей накладки, к излучающей поверхности которой присоединяется концентратор или бустер.

При постановке задачи на выбор и проектирование пьезоэлектрического преобразователя электрических колебаний в первую очередь осуществляется определение предельной потребляемой мощности преобразователя, необходимой для обеспечения требуемых параметров ультразвукового воздействия. Поскольку, используемые на практике ультразвуковые аппараты условно делятся на несколько классов по мощностным характеристикам электронных генераторов, то рациональной является аналогичная классификация пьезоэлектрических преобразователей (и колебательных систем в целом).

Все пьезоэлектрические преобразователи обычно проектируются и изготавливаются на основе стандартных кольцевых пьезоэлементов, максимальный диаметр которых не превосходит 50 мм. Минимальный размер пьезоэлементов может быть менее 20 мм, однако на практике используются пьезоэлектрические элементы кольцевой формы с внешним диаметром более 20–24 мм и внутренним диаметром более 10–12 мм. Наличие внутреннего диаметра указанного размера необходимо для резьбового соединения элементов (накладок и пьезоэлементов) преобразователя. В связи с этим, выбор типоразмера пьезоэлектрических элементов преобразователя осуществляется из условия обеспечения определенных энергетических параметров ультразвукового воздействия, а необходимый преобразователь проектируется по определённой конструктивной схеме (рис. 2).

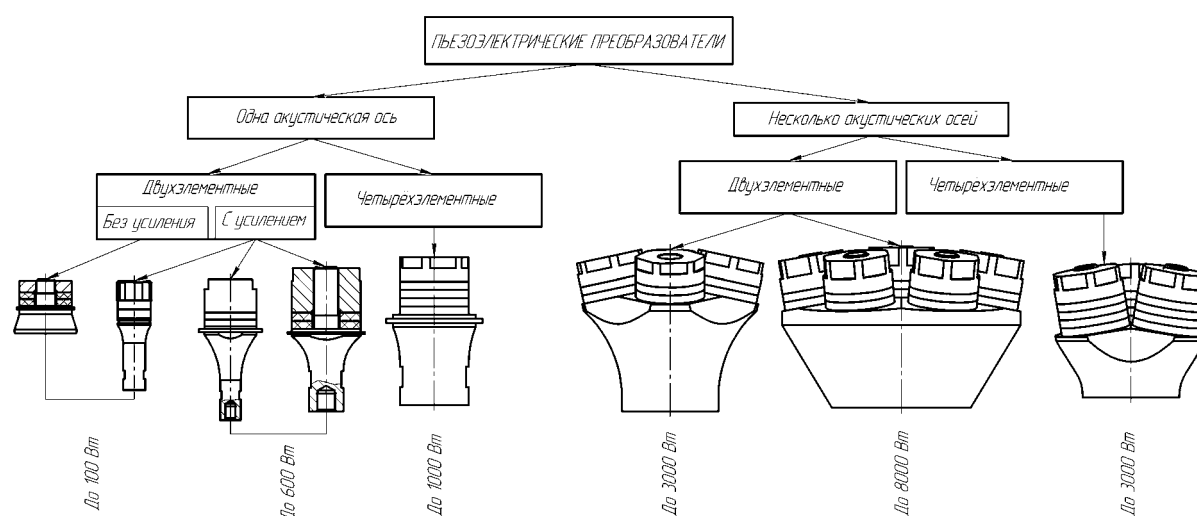


Рис. 2. Выбор пьезоэлектрического преобразователя

Как показано на рис. 2, основным параметром при выборе конструктивной схемы пьезоэлектрических преобразователей, является размер и количество пьезоэлементов, необходимых и достаточных для обеспечения требуемого ультразвукового воздействия.

На одной акустической оси можно разместить не более четырёх последовательно установленных пьезоэлементов, поскольку дальнейшее увеличение мощности преобразователя путем последовательного размещения пьезоэлементов неэффективно из-за ухудшения условий охлаждения пьезоэлементов внутри пакета. В связи с этим возникает необходимость суммирования мощности отдельных пакетов пьезоэлементов, расположенных на различных акустических осях пьезопреобразователя.

Таким образом, наличие одной или нескольких акустических осей, по которым осуществляется преобразование электрических колебаний и их суммирование определяет мощностные характеристики ультразвуковых колебательных систем и всего ультразвукового оборудования в целом.

Конструктивная схема ультразвуковой колебательной системы для оборудования первой и второй мощностных групп может совмещать в себе пьезоэлектрический преобразователь и концентратор [3], функцию которого выполняет рабочая частотопонижающая накладка, выполненная в виде тела вращения с изменяющимся диаметром. Такой преобразователь может быть выполнен в виде единой конструкции, оканчивающийся сменным или несменным рабочим инструментом с излучающей поверхностью определённой формы и площади. Как правило, пьезопреобразователь, входящий в состав описанной колебательной системы, содержит два кольцевых пьезоэлемента с внешним диаметром 24–38 мм и внутренним диаметром 12–16 мм.

Пьезопреобразователь третьей мощностной группы выполняется на базе пьезоэлементов диаметром более 40 мм и применяется в составе оборудования мощностью от 400 до 1000 Вт.

В этом случае пьезопреобразователь выполняется по конструктивной схеме, содержащей два или четыре пьезоэлемента диаметром 50 мм, расположенных на одной акустической оси. Количество пьезоэлементов в пьезопреобразователе выбирается чётным и зависит от мощности, создаваемой колебательной системы. Применение в пьезопреобразователе четырёх кольцевых пьезоэлементов с внешним диаметром 50 и внутренним диаметром 20 мм обеспечивает эффективную работу преобразователя в составе ультразвуковых аппаратов мощностью до 1000 ВА.

Применение в преобразователе более четырёх пьезоэлементов нерационально, поскольку эффективный прирост мощности за счет двух дополнительных пьезоэлементов не превышает 20%. Попытки дальнейшего увеличения мощности приводят к тому, что даже при наличии принудительного воздушного охлаждения пьезоэлементы внутри пакета перегреваются, что приводит к их деполяризации и выходу из строя преобразователя.

Пьезопреобразователь следующей мощностной группы применяется в составе ультразвукового оборудования мощностью более 1000 Вт. Такие преобразователи имеют несколько акустических осей и состоят из трёх, четырёх, семи или более пьезопакетов, расположенных равномерно по поверхности преобразователя. Каждый из пакетов содержит два или четыре пьезоэлемента с внешним диаметром 50 мм.

Такая конструкция пьезопреобразователя позволяет суммировать мощности ультразвуковых колебаний, генерируемые набором из нескольких пакетов, содержащих стандартные пьезоэлементы. Количество пьезоэлементов в пакете также должно быть чётным и не превышать четырёх пьезоэлементов в пакете, для предотвращения их перегрева.

Дальнейшие действия разработчика ультразвуковой колебательной системы связаны с решением вопроса крепления колебательной системы в составе технологического оборудования. Для этого используется промежуточное звено, называемое бустером.

### 3. ВЫБОР ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЗВЕНА

С учетом размера и количества пьезоэлементов, составляющих преобразователь необходимой мощности, осуществляется выбор бустерного (согласующего) звена по схеме, показанной на рис. 3.

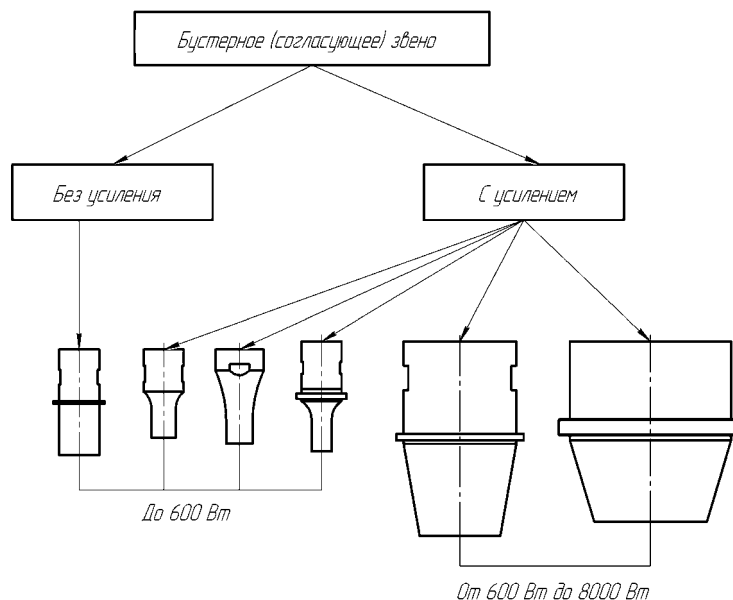


Рис. 3. Схема выбора бустерного звена

Промежуточные звенья необходимы для обеспечения оптимального согласования узлов, соединяемых промежуточным звеном, обеспечения максимальной передачи мощности колебаний от их источника к нагрузке, крепления УЗКС в технологическом оборудовании, дополнительного усиления колебаний, а также выполнения вспомогательных функций, таких как формирование узла тепловой отсечки, теплового отделения пьезопреобразователей от зон повышенной температуры, от технологических сред повышенной химической агрессивности и т. п.

В общем случае бустер представляет собой полуволновую резонансную металлическую конструкцию цилиндрической формы, рассчитанную на рабочую частоту преобразователя. Выполнение бустера с различными входным и выходным диаметрами и различной формой перехода между участками разного диаметра позволяет изменять амплитуду механических колебаний, формируемых преобразователем. Наибольшее распространение получили бустерные звенья, обеспечивающие усиление амплитуды ультразвуковых колебаний. Однако усиление бустерных звеньев на практике не превышает 2–4 единиц.

Поскольку ультразвуковая колебательная система для оборудования первой и второй мощностных групп может совмещать в себе пьезоэлектрический преобразователь и концентратор, выбор бустерного звена наиболее актуален для оборудования, относящегося к третьей и четвертой мощностным группам.

#### 4. ВЫБОР КОНЦЕНТРАТОРА И РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

Ультразвуковой рабочий инструмент является важным элементом, поскольку он обеспечивает воздействие на технологические среды. Рабочий инструмент, совершая колебания заданного вида, обеспечивает вывод ультразвуковых колебаний в обрабатываемую среду через колеблющуюся рабочую (излучающую) поверхность или осуществляет механическое воздействие через контакт колеблющейся с ультразвуковой частотой поверхности с изделием или объектом.

В зависимости от формы и размеров рабочих инструментов, характера их влияния на колебательную систему, все инструменты ультразвуковых аппаратов можно условно разделить на пассивные и активные (резонансные).

Поэтому, заключительным этапом проектирования ультразвуковых колебательных систем является выбор рабочего инструмента. Схема, поясняющая возможности выбора различных рабочих инструментов, представлена на рис. 4.

Для ультразвукового оборудования первой, второй и третьей мощностных групп наибольшее распространение получили пассивные рабочие инструменты грибовидной формы, различающиеся по диаметру и площади излучающей поверхности.

Для оборудования мощностью до 100 Вт применяются рабочие инструменты диаметром 10–20 мм, до 400 Вт применяются рабочие инструменты диаметром 20–25 мм. Для оборудования мощностью от 400 до 1000 Вт применяются рабочие инструменты диаметром 25–35 мм. Для аппаратов мощностью от 400 до 1000 Вт применяются рабочие инструменты диаметром 25–45 мм и более. В некоторых случаях возможно применение активных двухполуволновых инструментов или инструментов, имеющих развитую излучающую поверхность переменного сечения.

Для оборудования мощностью свыше 1000 Вт, кроме рабочих инструментов грибовидной формы, применяются активные многополуволновые рабочие инструменты, что позволяет обеспечить дополнительное увеличение амплитуды колебаний при использовании более развитой поверхности излучения.

Для комплектации ультразвуковых аппаратов мощностью до 8000 Вт используются рабочие инструменты с развитой поверхностью излучения, содержащие в своем составе последовательно и соосно установленные волноводы цилиндрической формы переменного диаметра (от 70 мм), что позволяет произвести в кавитационном режиме обработку большого объема жидкой среды.

#### 5. ПРИМЕР ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ И ПОСТРОЕНИЯ УЗ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Пример выбора составляющих и построения ультразвуковой колебательной системы мощностью до 1000 Вт путём поэтапного выбора отдельных конструктивных элементов представлен на рис. 5.

Выбор отдельных составляющих и конструктивной схемы позволяет создать ультразвуковую колебательную систему с необходимыми параметрами ультразвукового воздействия: по мощности, интенсивности излучения, частоте, поверхности и направлению излучения и т. п.

На рис. 6 представлены разработанные в соответствии с изложенным подходом типичные ультразвуковые колебательные системы различной мощности и назначения.

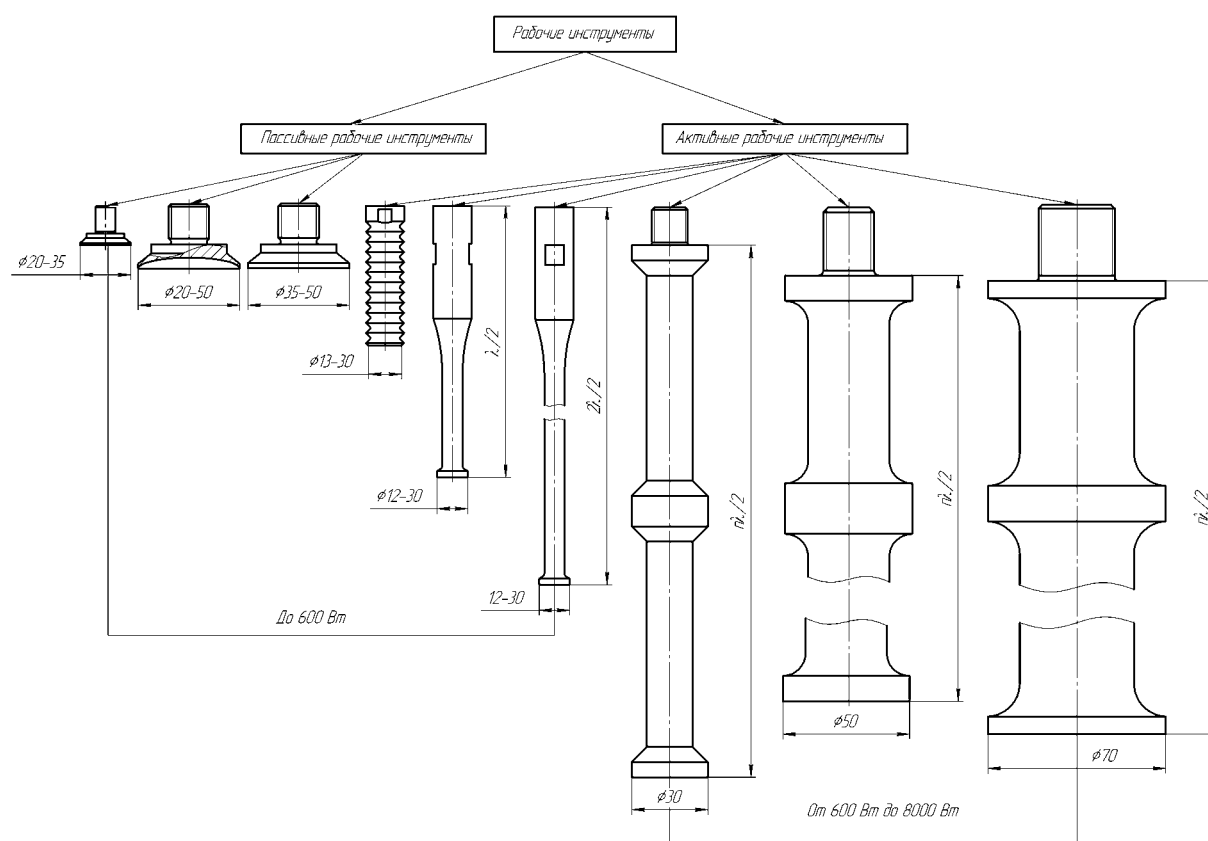


Рис. 4. Схема выбора рабочего инструмента

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход обеспечивает рациональный выбор и построение ультразвуковых колебательных систем при создании и применении современного ультразвукового технологического оборудования, сократив время на проектирование и материальные затраты на изготовление.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Хмелёв, А. Н. Сливин, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 196 с.
2. В. Н. Хмелёв, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
3. Патент 2141386 Российская Федерация, мпк b06b 3/00. Ультразвуковая колебательная система [текст] / Р.В. Барсуков, В.Н. Хмелёв, С.Н. Цыганок; заявитель и патентообладатель Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – № 97120873/28, заявл. 15.12.97; опубл. 20.11.99.
4. V. N. Khmelev, V. V. Pedder, S. N. Tsyganok, R. V. Barsukov. The Features Investigation of Piezoelectric Transducers. International Conference And Seminar On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – p. 233–241.

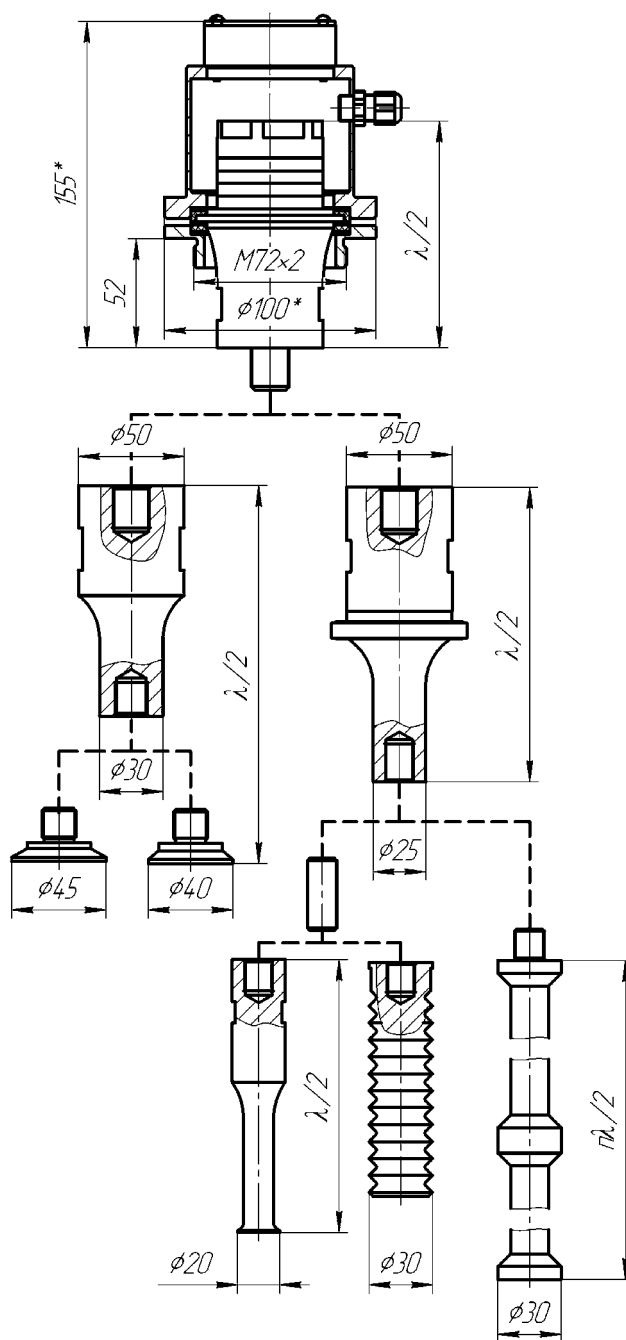


Рис. 5. Выбор ультразвуковой колебательной системы путём поэтапного выбора отдельных конструктивных элементов



Рис. 6. Ультразвуковые колебательные системы различной мощности и назначения