

УДК 621.6-52

Луговской¹ А.Ф., д.т.н., проф., Мовчанюк² А.В., к.т.н., доц., Фесич² В.П., Новосад² А.А., Гришко¹ И.А., к.т.н.
 1- Механико-машиностроительный институт НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина;
 2- Радиотехнический факультет НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ТРУБЧАТЫМ КАВИТАТОРОМ

Lugovskoy A., Movchanuk A., Fesich V., Novosad A., Gryshko I.
 National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

MECHATRONIC CONTROL SYSTEM OF ULTRASONIC TUBULAR CAVITATOR

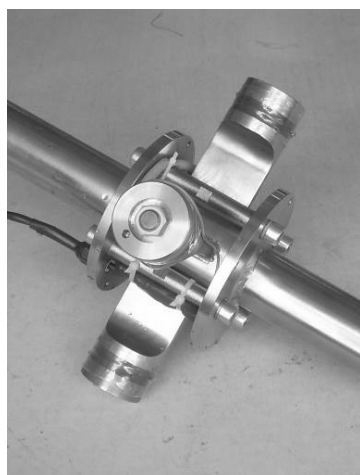
В работе проанализированы основные конструкции ультразвуковых проточных кавитаторов. Описаны особенности форм кавитационных областей при различных модах колебаний стенок кавитатора. Проведена оценка проблем, возникающих при проектировании электронной системы управления ультразвуковыми приводами кавитатора. Рассмотрены особенности современной элементной базы систем управления ультразвуковыми приводами. Предложена структурная схема управления ультразвуковыми приводами многосекционного ультразвукового проточного кавитатора. Описаны особенности реализации предложенной системы управления. Приведен пример выбора элементной базы для реализации системы управления. Показано взаимодействие функциональных узлов системы управления между собой. Предложен алгоритм поддержания резонансного режима работы ультразвукового привода. Приведены примеры аппаратно-программной реализации систем управления одно и многосекционным проточными кавитаторами.

Ключевые слова: ультразвуковая кавитационная обработка, ультразвуковые приводы, мехатронная система управления, ультразвуковая кавитация, алгоритм управления.

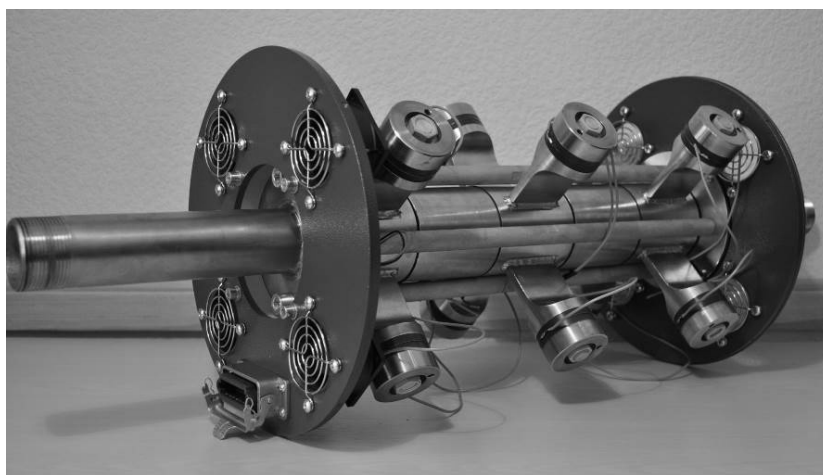
Введение

Ультразвуковые кавитационные устройства находят широкое применение в широком спектре технологических операций, протекающих с использованием жидких сред [1-3]. При этом особый интерес представляют собой устройства, позволяющие обрабатывать жидкость в потоке – ультразвуковые проточные кавитаторы. Ультразвуковые технологические устройства подобного типа имеют ряд неоспоримых преимуществ – не вносят дополнительного гидравлического сопротивления в гидросистему, не засоряются и позволяют электронным способом регулировать интенсивность кавитационного воздействия.

Ультразвуковые проточные кавитаторы [4, 5] представляют собой цилиндрическую кавитационную камеру с ультразвуковыми резонансными приводами продольных перемещений на наружной образующей поверхности (рис.1а). Приводы обычно имеют полуволновую акустическую схему и совмещены с ножевидным трансформатором колебательной скорости. Такое конструктивное решение позволяет максимально эффективно, в зависимости от выбранной моды колебаний, возбудить в трубчатой конструкции кавитационной камеры чисто радиальные или радиально-изгибные колебания, а возможность секционирования трубчатой камеры позволяет избавиться от продольных радиально-изгибных колебаний и акустического взаимовлияния отдельных секций (рис.1б). Количество последовательно установленных одинаковых секций можно регулировать время кавитационной обработки потока жидкости при заданной скорости течения.



а



б

Рис. 1. Ультразвуковой трубчатый кавитатор (а – односекционный; б - многосекционный)

© Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., Фесич В.П., Новосад А.А., Гришко И.А., 2014

В зависимости от формы колебаний кавитационной камеры во внутреннем объеме камеры возникают кавитационные области различной конфигурации. Так, при радиальных колебаниях стенок камеры в области продольной оси кавитатора наблюдается максимум звукового давления и, соответственно, максимальная интенсивность кавитационных явлений (рис.2а), а при радиально-изгибных колебаниях - минимум (рис.2б). Можно сказать, что кавитатор с радиальными колебаниями стенок камеры обладает фокусирующими свойствами (по аналогии с акустическими линзами), а с радиально-изгибными – нет. Эта особенность накладывает отпечаток на области применения соответствующих типов кавитаторов. Кавитаторы с радиальными колебаниями подходят для технологических процессов, в которых необходимо получить максимальную интенсивность ультразвука, например, при обеззараживании жидкостей, а с радиально-изгибными – где важна равномерность обработки жидкости, например, при гомогенизации, диспергировании или экстрагировании.

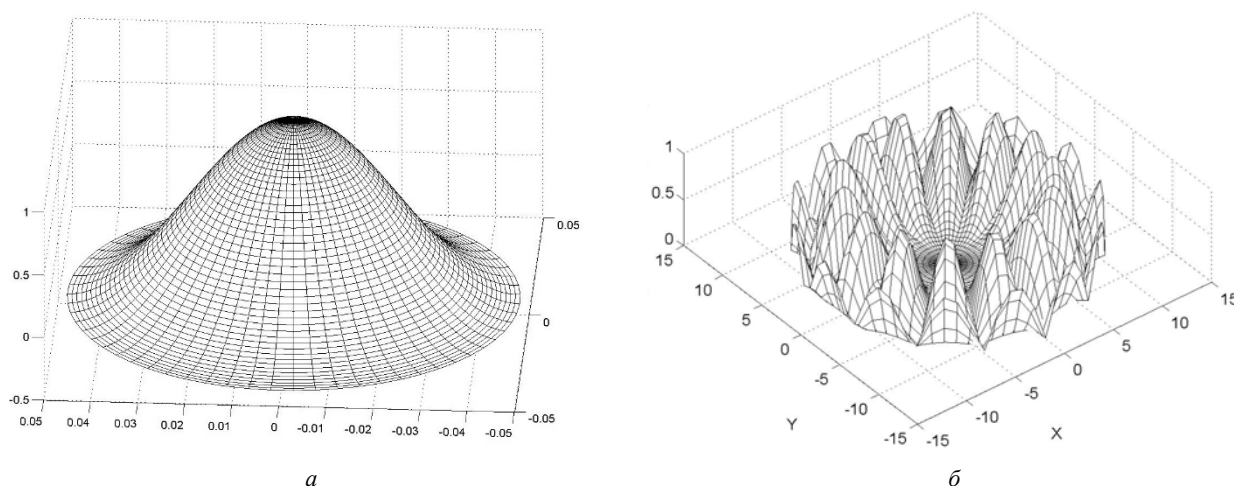


Рис. 2. Распределение звукового давления в сечении трубчатого кавитатора (а – радиальные колебания; б – радиально-изгибные колебания)

Ультразвуковые кавитаторы представляют собой сложную мехатронную систему, состоящую из резонансной камеры, резонансного ультразвукового привода и электронной системы управления. Проектирование ультразвуковых кавитационных устройств должно производиться с учетом строгой взаимосвязи этих частей. В связи с тем, что кавитационная камера возбуждается несколькими резонансными приводами, а так же возможна работа нескольких секций одновременно, классические подходы построения электронной системы управления [6, 7] являются неприемлемыми. Применение новой элементной базы [8] и использование прогрессивных методов синтеза сигналов управления [9, 10] позволяет разрабатывать новые эффективные системы управления ультразвуковым кавитационным оборудованием. Применение микроконтроллеров в системе управления позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления приводами. При разработке системы управления ключевым вопросом является выбор критериев поддержания резонансного режима и управления амплитудой колебаний резонансного привода. Особенности конструкции трубчатого кавитатора затрудняют непосредственное измерение интенсивности кавитационных процессов в технологической жидкости [11], а, следовательно, и использование акустических датчиков для получения сигнала обратной связи.

Целью статьи является создание алгоритма управления ультразвуковым трубчатым кавитатором.

Особенностью трубчатых кавитаторов является использование нескольких резонансных приводов, совершающих синфазные колебания. В связи с этим все приводы должны работать на одной частоте, а, следовательно, приводы, как одной секции, так и всех секций, в случае наращивания их количества должны управляться от одного задающего генератора. При этом приводы одной секции должны быть соединены параллельно, что позволяет избежать возникновения крутильных колебаний в стенках кавитационной камеры (рис.3).

Оговоренные особенности делают целесообразным построение системы управления по параллельной структуре, когда в системе имеется один задающий генератор, находящийся в общем микропроцессорном блоке и одинаковых каналов, состоящих из блоков питания и генераторов с внешним возбуждением для каждой секции кавитатора. Применение блоков питания позволяет отдельно регулировать амплитуду колебаний приводов каждой секции путем изменения напряжения питания выходных каскадов генераторов с внешним возбуждением. При параллельной структуре построения в качестве сигналов обратной связи могут быть использованы ток через привод и напряжение на нем. При использовании генератора с внешним возбуждением ток через выходной каскад и напряжение на выходном каскаде прямо пропорциональны току и напряжению на приводе.

В связи с тем, что для большинства технологических процессов важна плотность ультразвуковой энергии в технологической жидкости, целесообразно стабилизировать подводимую к приводе мощность электрического сигнала.

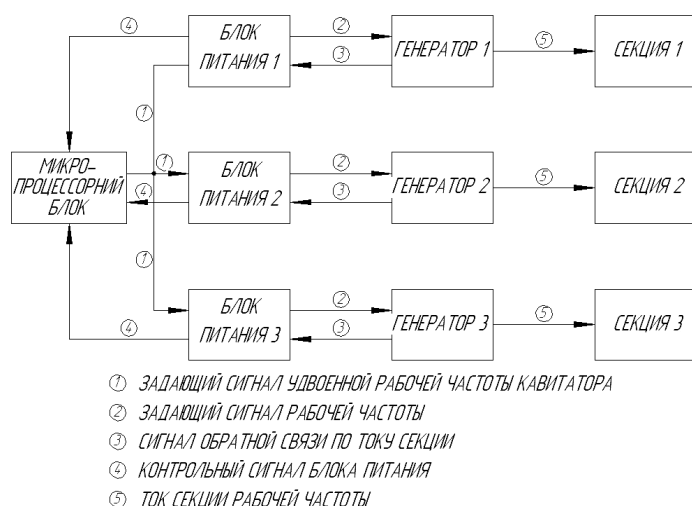


Рис. 3. Структурная схема системы управления ультразвуковым трубчатым кавитатором

При этом блок питания будет работать в качестве источника стабильной мощности, т.е. поддерживать на постоянном уровне производство тока и напряжения на выходном каскаде ультразвукового генератора с внешним возбуждением. Следовательно, критерием резонансного режима работы привода может служить минимум напряжения питания выходного каскада генератора с внешним возбуждением. При этом, если при увеличении резонансной частоты напряжение будет возрастать – это означает, что привод работает на левом склоне резонансной кривой, уменьшаться – на правом. Поэтому, если микропроцессорный

блок управляет частотой привода в «свирующем» режиме, в качестве сигнала обратной связи может использоваться сигнал, свидетельствующий об увеличении или уменьшении напряжения питания генератора с внешним возбуждением. В случае параллельной работы нескольких секций кавитатора решение об увеличении или уменьшении частоты может приниматься по критерию большинства (кибернетический метод).

В результате удалось разработать простой алгоритм работы микропроцессорного блока управления (рис.4).

Микропроцессорный блок и блоки питания секций были реализованы на микроконтроллерах фирмы ATMEL семейства AVR ATMEGA8. В микропроцессорном блоке микроконтроллер управляет специализированной микросхемой DDS (прямой цифровой синтез) производства фирмы ANALOG DEVICES. Изменение частоты осуществляется по внутреннему прерыванию контроллера. Шаг изменения частоты задается программно. Точность поддержания резонансной частоты привода равняется удвоенной величине шага частоты. Скорость изменения частоты определяется частотой внутренних прерываний контроллера.

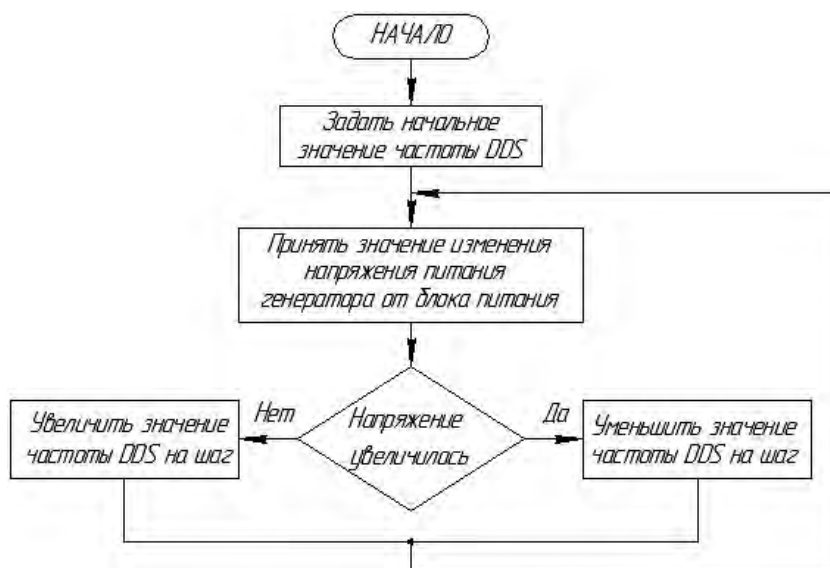


Рис. 4. Алгоритм управления трубчатым кавитатором

Блок питания микроконтроллера выполнен в виде понижающего преобразователя напряжения. Стабилизация мощности осуществлена путем управления коэффициентом заполнения сигнала ШИМ микроконтроллера. Для измерения значений тока и напряжения использован встроенный 10 битный АЦП микроконтроллера. Для уменьшения влияния электрических наводок и помех, а также кавитационного шума, модулирующего значение тока через привод за счет прямого пьезоэффекта, был применен алгоритм скользящего среднего для усреднения значений АЦП.

Разработанный алгоритм показал свою эффективность для управления как односекционным (рис.5а), так и многосекционным проточным кавитатором (рис.5б). При этом были реализованы все преимущества программных методов управления: возможность изменения программным путем плотности ультразвуковой

енергии, программная защита от аварийных режимов работы, программный выбор точности поддержания резонансной частоты привода и т.д.

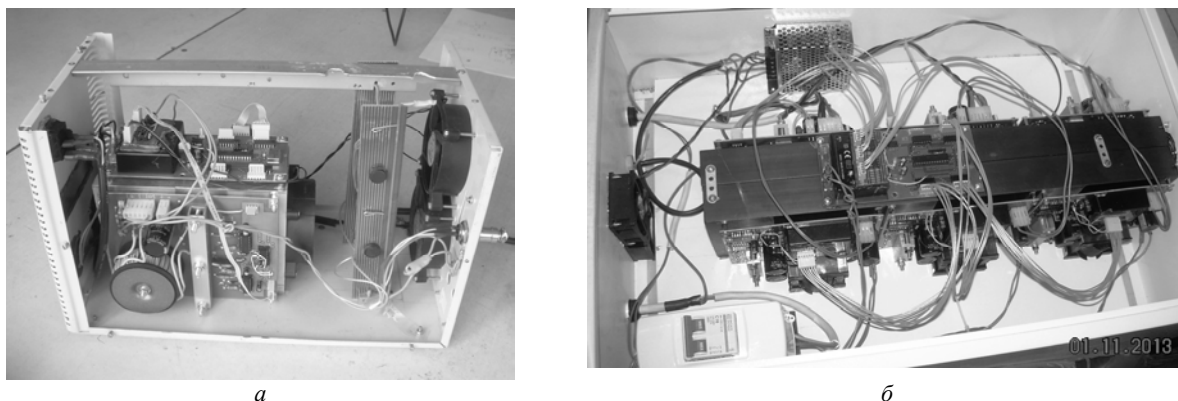


Рис. 5. Система управления проточным кавитатором
(а – односекционным; б – многосекционным)

Выводы

В результате была доказана целесообразность применения прямого цифрового синтеза сигналов для управления ультразвуковыми приводами. Стабилизация мощности, потребляемой секциями кавитатора, позволяет поддерживать плотность ультразвуковой энергии, а значит и производительность технологического процесса на заданном уровне. Применение программных средств управления позволяет подстраивать ультразвуковой кавитатор под требования технологического процесса без внесения конструктивных изменений в мехатронную систему управления. Применение параллельной структуры системы управления повышает надежность за счет снижения коэффициента нагрузки силовых элементов блока питания и генератора с внешним возбуждением. Использование бинарного сигнала обратной связи резко повышает общую помехоустойчивость.

Анотація. В роботі проаналізовані основні конструкції ультразвукових проточних кавітаторів. Показані особливості формування кавітаційних областей при різних умовах збудження стінок кавітатора. Проведена оцінка проблем, що виникають при проектуванні електронної системи керування ультразвуковими приводами кавітатора. Запропоновано структурну схему керування ультразвуковими приводами багатосекційного ультразвукового проточного кавітатора. Описано особливості реалізації запропонованої системи керування з урахуванням кількості встановлених секцій трубчастого кавітатора. Наведено алгоритм підтримки резонансного режиму роботи ультразвукового приводу. Наведені приклади апаратно-програмної реалізації систем керування проточними кавітаторами.

Ключові слова: ультразвукова кавітаційна обробка, ультразвукові приводи, мехатронна система керування, ультразвукова кавітація, алгоритм керування.

Abstract. The aim of the article is to provide control algorithm of multisection tubular ultrasonic flow cavitator.

In the present paper analyzes the basic construction of ultrasonic flow cavitators. This article shows the features of cavitation fields formation under various conditions of fluctuations of walls cavitator. We have analyzed the problems that arise in the design of an electronic control system with ultrasonic cavitators. The article discusses questions which touched the features of modern element base for control system ultrasonic cavitators. The authors of this paper was developed a control block diagram of multisection ultrasonic flow cavitator. In the present study were shown the possible changes that may occur in the control block diagram associated with changes in the number of cavitator sections. This article describes the implementation features of the proposed control system. An example selecting element base for the implementation of the control system. Shows the interaction functional units of the control system among each other. We have an algorithm for maintaining the resonant mode of the ultrasonic actuator work. We have examples of hardware and software implementation of control systems once and multisection by flow cavitators.

Conclusion. Proved the feasibility of direct digital synthesis signal to control the ultrasonic actuators.

Stabilization of the consumed power by the cavitator sections allows maintaining ultrasound energy density means productivity of technological process at set level.

Using of programmatic facilities of management allows you to adjust the ultrasonic cavitator the requirements of the technological process without making structural changes in the mechatronic systems of control.

The use of parallel structure control system improves reliability by reducing the load factor of the power components and power supply generator with external excitation.

Using a binary feedback signal sharply improves the overall noise immunity.

Keywords: ultrasonic cavitation treatment, ultrasonic actuators, mechatronic control system, ultrasonic cavitation, the control algorithm.

Библиографический список использованной литературы

1. *Луговской А.Ф.* Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.
2. *Эльпинер И.Е.* Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматиз, 1963. – 430 с.
3. *Хмелев В.Н.* Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск.: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та БТИ, 2007. – 400с.
4. *Луговской А.Ф.* Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А.Ф. Луговской, И.А. Гришко // Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця, 2009. – № 4 (26). – С. 3 – 6.
5. *Луговской А.Ф.* Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, И.А. Гришко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2010. – Вип. 59. – С. 285 – 287.
6. *Донской А.В.* Ультразвуковые электротехнологические установки / Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С./ 2-е изд., перераб. и доп.– Ленинград. : Энергоиздат. Ленинград. отд-ние., 1982. – 208с.
7. *Луговський О.Ф.* Особливості побудови систем керування ультразвуковими резонансними приводами / О.Ф. Луговський, В.П. Фесіч, А.В. Мовчанюк // Вібрації в техніці і технологіях. - 2009. - №4(56) - Вінниця, ВДАУ. - С. 39-44.
8. *Омелич М.Ф.* Особенности построения мощных буферных каскадов систем управления ультразвуковыми приводами систем мехатроники / М.Ф. Омелич, А.В. Мовчанюк, В.П. Фесич // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. - 2011. - № 61, т. 2. - С. 88-91.
9. *Фесіч В.П.* Прямий цифровий синтез (DDS) у системах керування ультразвуковими резонансними приводами / В.П. Фесіч // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаробудування. – 2012. – № 48. – с. 134-139.
10. *Фесіч В. П.* Застосування алгоритму прямого цифрового синтезу (DDS) в системах керування ультразвуковими резонансними приводами / В. П. Фесіч, А. В. Мовчанюк, О. Ф. Луговський // Вісн. Нац. техн. ун-ту України "КПІ". Сер. Машинобудування. - 2010. - Вип. 59. - С. 277-280.
11. *Мовчанюк, А.В.* Порівняльний аналіз гідрофонів для вимірювання інтенсивності кавітації акустичним методом / А.В. Мовчанюк, А.А. Новосад, М.Ф. Омелич // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. - 2010. - № 59. - С. 245-249.

References

1. *Lugovskiy A.F., Chuhraev N.V.*, Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennyh tehnologiyah (Ultrasonic cavitation in modern technologies) Kiev: Vidavnichno-poligrafichnij centr «Kiiv'skij universitet», 2007. 244 p.
2. *Jel'piner I.E.*, Ul'trazvuk. Fiziko-himicheskoe i biologicheskoe (Ultrasound. Physico-chemical and biological action) Moskov: Fizmatiz, 1963. 430 p.
3. *Hmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Cyganok S.N., Shalunov A.V.*, Ul'trazvukovye mnogofunkcional'nye i specializirovannye apparaty dlja intensivatsii tehnologicheskikh processov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem hozjajstve (Ultrasonic Multifunctional and specialized devices for intensification of technological processes in industry, agriculture and households) Bijsk.: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta BТИ, 2007,400 p.
4. *Lugovskiy A.F., Grishko I.A.*, Problemy sozdaniya tehnologicheskogo oborudovanija dlja ul'trazvukovogo kavitacionnogo obezzarazhivaniya vody (The problem of creating technological equipment for ultrasonic cavitation water disinfection) Promislova gidravlika i pnevmatika. – Vinnicja, 2009. no 4 (26). pp. 3 – 6.
5. *Lugovskiy A.F., Movchanjuk A.V., Grishko I.A.*, Issledovanie raboty ul'trazvukovogo trubchatogo kavitatora v rezhime radial'nyh kolebanij (The study of the ultrasonic tubular cavitator mode of radial oscillations) Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", 2010. no 59. pp. 285 – 287.
6. *Donskoy A.V., Keller O.K., Kratyish G.S.* Ul'trazvukovyie elektrotehnologicheskije ustanovki (Ultrasonic electrotechnological installation)/ 2-e izd., pererab. i dop.– Leningrad. : Energoizdat. Leningrad. otd-nie., 1982. – 208p.
7. *Lugovskiy O.F., Fesich V.P., Movchanjuk A.V.* OsoblivostI pobudovi sistem keruvannya ultrazvukovimi rezonansnimi privodami (Features of construction of control system by ultrasonic resonant drive)/ VІbratsiyi v tehnitsi i tehnologiyah. - Vinnitsya, VDAU, 2009. no 4(56). pp. 39 – 44.
8. *Omelich M.F., Movchanjuk A.V., Fesich V.P.* Osobennosti postroeniya moschnyih bufernyih kaskadov sistem upravleniya ultrazvukovyimi privodami sistem mehatroniki (Features of construction of powerful buffer cascades of control system by the ultrasonic drives of the systems of mechatronic) Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", 2011. no 61. pp. 88 – 91.
9. *Fesich V.P.* Pryamiy tsifrovij sintez (DDS) u sistemah keruvannya ultrazvukovimi rezonansnimi privodami / V.P. FesIch (A direct digital synthesis (DDS) is in control system by ultrasonic resonant drive) Visnik NTUU «KPI». Seriya Radiotehnika. Radioaparobuduvannya, 2012. no 48. pp. 134 – 139.
10. *Fesich V.P., Movchanjuk A.V., Lugovskiy O.F.* Zastosuvannya algoritmu pryamogo tsifrovogo sintezu (DDS) v sistemah keruvannya ultrazvukovimi rezonansnimi privodami (Application of algorithm of direct digital synthesis (DDS) is in control system by ultrasonic resonant drive) Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", 2010. no 59. pp. 277 – 280.
11. *Movchanyuk, A.V., Novosad A.A., Omelich M.F.* Porivnyalnyi analiz gidrofoniv dlya vimiryuvannya IntensivnostI kavItatsiyI akustichnim metodom (Comparative analysis of hydrophones for measuring of intensity of cavitation by an acoustic method) Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", 2010. no 59. pp. 245 – 249.

Подана до редакції 19.12.2014