Научная статья
УДК 631.362.34:[621.85.052:62-189.2]
doi:10.35694/YARCX.2023.63.3.014

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ УЛЬТРАЗВУКОМ ФИЛЬТРА С ПОЛИМЕРНЫМИ ФИЛЬТРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Артем Сергеевич Угловский[1], Ирина Марковна Соцкая[2], Елена Владимировна Шешунова[3]
[1, 2, 3]Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
[1]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786
[2]i.sockaya@yarcx.ru
[3]e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656

Реферат. В статье представлен разработанный авторами фильтр с полимерными элементами, имеющий микроконтроллерную систему, которая управляет выходной частотой ультразвукового генератора и питает блоки многослойных преобразователей. Частота механического резонанса колебательной системы зависит от многих параметров и меняется в процессе работы. Со временем фильтрующие элементы забиваются, теряя эффективность очистки масла. Поэтому фильтрующие элементы заменяются новыми. Для обеспечения высокой эффективности частота очистки фильтра должна постоянно контролироваться и настраиваться на резонансную частоту. Применение микроконтроллерной системы позволит управлять ультразвуковым преобразователем, отправляя пакеты импульсов с частотой 30 кГц, для обратной связи применяется датчик ультразвука HC-SR04. Данный датчик необходим для контроля передачи преобразователем ультразвуковых колебаний. В приведённых расчётах по преобразователю ультразвуковых колебаний резонансная частота будет составлять 35,5 кГц, что соизмеримо с частотой передачи импульсов микроконтроллера.

Ключевые слова: *резонанс, ультразвуковой преобразователь, кавитация, частота*

SIMULATION OF THE FILTER CLEANING SYSTEM BY ULTRASONIC SOUND WITH POLYMER FILTER ELEMENTS

Artem S. Uglovskiy[1], Irina M. Sotskaya[2], Elena V. Sheshunova[3]
[1, 2, 3]Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
[1]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786
[2]i.sockaya@yarcx.ru
[3]e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656

Abstract. The article presents the filter with polymer elements developed by the authors, having a microcontroller system that controls the output frequency of the ultrasonic generator and feeds the blocks of sandwich transducers. The frequency of mechanical resonance of the oscillating system depends on many parameters and varies during operation. Over time, the filter elements become clogged, losing the efficiency of oil cleaning. Therefore, the filter elements are replaced with new ones. To ensure high efficiency the filter cleaning frequency must be constantly monitored and tuned to the resonant frequency. The use of a microcontroller system will allow you to control the ultrasonic transducer by sending pulse packets at a frequency of 30 kHz, a HC-SR04 ultrasound sensor is used for feedback. This sensor is necessary to monitor the transmission of ultrasonic vibrations by the transducer. In the calculations given by the ultrasonic oscillation transducer, the resonance frequency will be 35.5 kHz, which is commensurate with the pulse transmission frequency of the microcontroller.

Keywords: *resonance, ultrasonic transducer, cavitation, frequency*

Введение. Ультразвуковая очистка – это процесс, при котором ультразвуковые волны в диапазоне от 20 до 80 кГц используются в соответствующем водном чистящем растворителе для очистки предметов. Ультразвуковые очистители применяются для точной очистки многих типов объектов, таких как топливные форсунки автомобилей, музыкальные инструменты, линзы, оптические де-

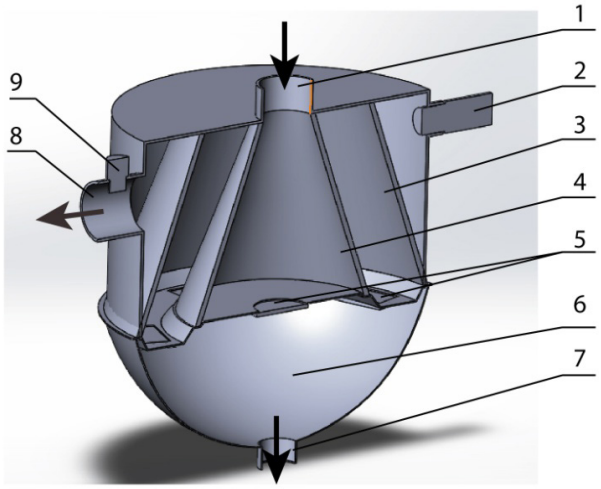
тали, часы, хирургические инструменты, зубные имплантаты, ювелирные изделия, промышленные детали и электронные детали. При ультразвуковой очистке преобразователи излучают ультразвуковые волны высокого давления в водную среду, что создаёт кавитационные пузырьки. Эти пузырьки оказывают сильное воздействие на загрязняющие вещества, которые прилипают к таким поверхностям, как металлы, керамика, стекло, пластик и резина. У них есть способность проникать в глухие отверстия, трещины. Цель состоит в том, чтобы тщательно удалить все следы загрязнения, плотно прилипшие к твёрдым поверхностям.

Ряд исследователей изучают процесс ультразвуковой очистки работающих фильтров с их снятием с двигателя [1; 2]. В данной работе проектируется способ очистки без снятия фильтра [3; 4].

Ультразвуковые волны высокого давления, используемые в предлагаемой работе, будут создавать сильное воздействие нежелательных прилипающих веществ к твёрдым поверхностям. Волны высокого давления имеют возможность получить доступ к глухим отверстиям.

Преобразователь является важным оборудованием для создания вибрации от ультразвуковой волны. Кавитация возникает в жидкости при прохождении ультразвуковой волны через жидкую среду в процессе очистки.

Одним из авторов статьи совместно с другими исследователями [5] разработан фильтр с полимерными фильтрующими элементами не только для очистки масел, но и любых жидкостей и нефтепродуктов. Устройство фильтра приведено на рисунке 1.



1 – ввод масла; 2 – ультразвуковой излучатель; 3 – первая стенка фильтрующего элемента; 4 – вторая стенка фильтрующего элемента; 5 – клапаны сброса загрязнений; 6 – ёмкость для хранения отложений и загрязнений; 7 – трубка вывода загрязнений; 8 – выход чистого масла; 9 – датчик давления.

Рисунок 1 – 3D-модель фильтра

Представленный на рисунке 1 фильтр работает следующим образом. Масло поступает на очистку через канал 1, попадает в расширяющуюся полость и проходит через первый фильтрующий элемент 4, затем попадает в следующую полость и проходит через второй фильтрующий элемент 3. Чистое масло выходит через канал 8. По мере загрязнения фильтрующих элементов 3 и 4 давление падает в трубке 8, что фиксирует датчик давления 9, включается ультразвуковой излучатель 2, очищая поверхность фильтрующих элементов 3 и 4. Открываются клапаны 5 для сброса отложений, которые перемещаются за счёт силы тяжести в полость 6. Отложения выводятся через штуцер 7 при проведении технического обслуживания. Двигатель может некоторое время работать с отложениями, находящимися в полости 6, поскольку эта полость изолирована от полостей очистки клапанами 5.

Материалы и методы исследований. Для исследования микроконтроллерной системы очистки ультразвуком были использованы программы NI Multisim и Proteus. С помощью данных приложений проектировались электронные схемы, и в ходе моделирования определялась рабочая частота ультразвукового генератора.

Результаты исследований. Ультразвуковая система очистки включает в себя: ультразвуковой генератор (PZT-4), ультразвуковые датчики. Ультразвуковой преобразователь PZT-4 типа «сэндвич» является пьезоэлектрическим керамическим преобразователем, который преобразует высокочастотные синусоидальные сигналы напряжения в высокочастотные механические вибрационные сигналы. Данный преобразователь может быть установлен на стенке фильтра (рис. 1, позиция 2). Высокочастотные механические вибрационные сигналы передаются через фильтр и действуют на чистящую среду. Характеристики ультразвукового преобразователя PZT-4 показаны в таблице 1. Рабочая частота данного преобразователя составляет 28 кГц, что подходит для большинства случаев очистки масел, мощность 120 Вт. Для управления данным преобразователем необходим мостовой инвертор на полевых транзисторах.

Пьезоэлектрические преобразователи, установленные с фильтром очистки, приводятся в действие генератором, возбуждающем ультразвуковые волны, которые проходят через жидкость и достигают фильтрующего элемента. Система ультразвуковой очистки изображена на рисунке 2.

На рисунке 2 вторичная обмотка трансформатора T1 усиливает напряжение транзисторов Q1 и

Таблица 1 – Характеристики ультразвукового преобразователя PZT-4

Модель	Частота, кГц	Ёмкость, пФ	Резонансное сопротивление, Ом	Высота, мм	Мощность, Вт	Сопротивление изоляции, МОм (2500 В – постоянный ток)
OKS-8UCT-5028	28 ± 0,5	7200 ± 10%	≤ 20 Ом	67–68	120	≥ 100

Q2. Обмотка трансформатора T2 выступает в качестве помехоподавляющего фильтра. Согласующая катушка индуктивности (L1) подключена непосредственно к ультразвуковому преобразователю колебаний [6–9].

Выходная частота ультразвукового генератора должна быть равна частоте механического резонанса преобразователя PZT-4. Эта механическая резонансная частота зависит от многих параметров, таких как пьезоэлектрический материал, температура, время, объём жидкости и поверхность очищаемых элементов. В случае несоответствия механической резонансной частоты преобразователя и генератора, система управления с обратной связью должна изменить выходную частоту и настроить инвертор на механическую резонансную частоту преобразователей. Схема генератора изображена на рисунке 3.

Блок-схема, показанная на рисунке 3, состоит из:

1) преобразователя переменного тока в постоянный;

2) мостового инвертора;

3) блока управления с генератором частоты;

4) разделительного трансформатора и фильтра;

5) ультразвукового датчика (S);

6) ультразвукового преобразователя (PT).

Постоянное напряжение, получаемое от мостового выпрямителя, преобразуется в переменный ток с частотой ультразвукового диапазона с помощью мостового инвертора на полевых транзисторах. Выход инвертора подаётся на пьезоэлектрический преобразователь через разделительный трансформатор и соответствующий согласующий фильтр импеданса.

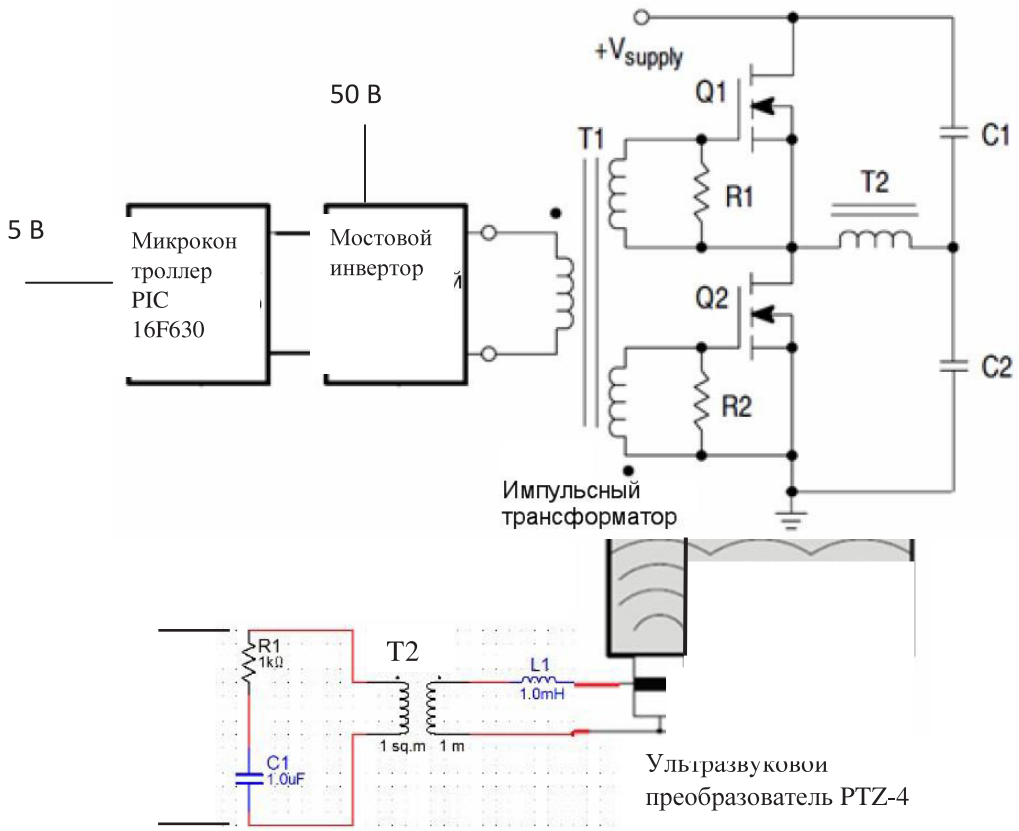


Рисунок 2 – Ультразвуковой генератор

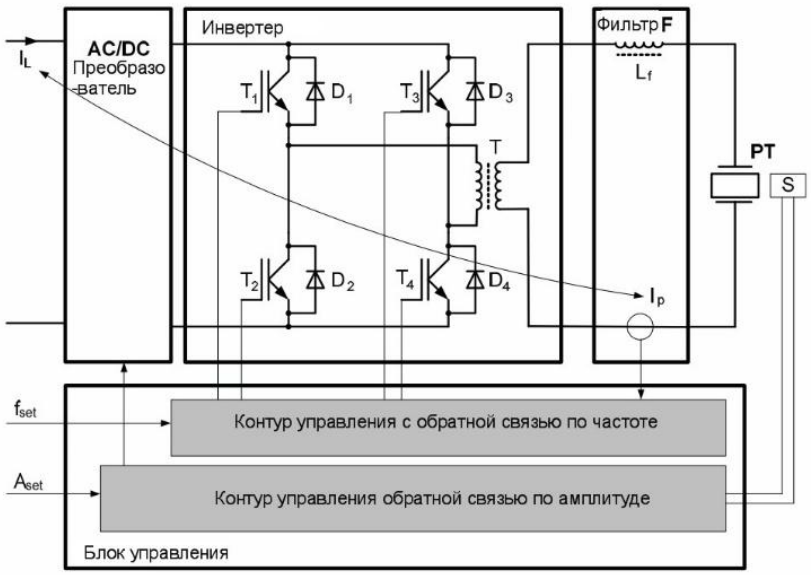


Рисунок 3 – Блок-схема ультразвукового генератора

Система очистки ультразвуковой волной включает преобразователь, схему усилителя, фильтр и жидкую среду. Преобразователь генерирует вибрацию от ультразвуковой волны. Вибрация передаётся на всё, что находится в фильтре. Некоторые загрязнители состоят из нерастворимых частиц, свободно прикреплённых и удерживаемых на месте ионными или когезионными силами, как показано на рисунке 4а. Кавитация и имплозия в результате воздействия ультразвука вытесняют и удаляют свободно удерживаемые загрязнения с поверхностей, изображенных на рисунке 4б.

Конфигурация ультразвукового очистителя показана на рисунке 5. ШИМ-сигнал (цифровой) генерируется микроконтроллером PIC на резонансной частоте 30 кГц для ультразвукового преобразователя. Он подаётся в мостовой инвертор для управления ультразвуковым преобразователем. Основным оборудованием для генерации ультразвуковой волны является ультразвуковой преобразователь. Ультразвуковой преобразователь преобразует электрическую энергию в акустическую.

Электрическая энергия на ультразвуковой частоте подаётся на пьезоэлектрический элемент (элементы) преобразователя за счёт вибрации. Эти колебания усиливаются резонансными массами преобразователя и направляются в жидкость через излучающую пластину.

Микроконтроллер имеет 6 выводов порта С, показанных на рисунке 5.

Два вывода RC0, RC1 задействованы под подключение ультразвукового датчика, а остальные подключаются к транзисторам мостового инвертора.

Данное решение позволит управлять ультразвуковым преобразователем с помощью микроконтроллера PIC 16F630, отправляя пакеты импульсов

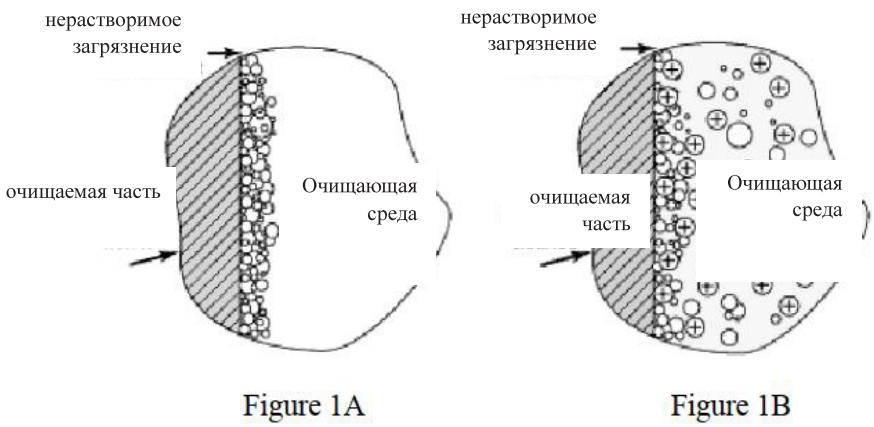


Рисунок 4 – Ультразвуковая очистка методом растворения

Моделирование системы очистки ультразвуком фильтра с полимерными фильтрующими элементами

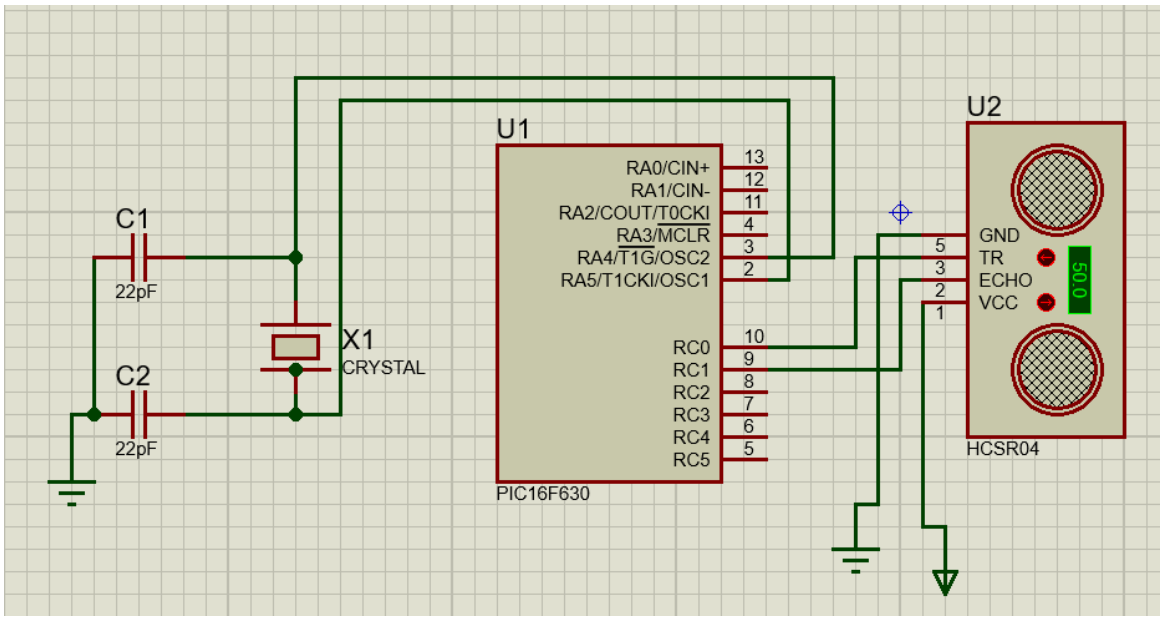


Рисунок 5 – Подключение микроконтроллера PIC 16F630 к ультразвуковому датчику и мостовому инвертору

с частотой 30 кГц. Датчик ультразвука HC-SR04 необходим для контроля передачи преобразователем ультразвуковых колебаний.

Микроконтроллер работает напрямую со схемой усилителя (рис. 6) и схемой мостового инвертора, отправляя сигналы на полевые транзисторы IRFP451 (рис. 7).

Переменные, которые устанавливаются при получении данных ультразвуковой очистки, представляют собой время и частоту. Частота регулируется с помощью микроконтроллера в качестве входной частоты ультразвукового генератора.

Ультразвуковой генератор выдаёт выходную частоту 28 кГц и напряжение 0–5 В. Время работы ультразвукового очистителя регулируется клавиатурой 4x4. Связь вибрации с частотой получается путём анализа колебаний, возникающих в пьезоэлектрическом генераторе при частотном регулировании ультразвука.

Для обеспечения максимальной эффективности пьезоэлектрических преобразователей частота генератора должна быть равна частоте механического резонанса преобразователя. Эта частота не является постоянной и варьирует в зависимости от многих условий.

Для управления ультразвуковым преобразователем с его механической резонансной частотой используется система обратной связи, которая измеряет разность фаз между фазой тока преобразователя и напряжением. При резонансе разность фаз должна быть равна нулю.

Микроконтроллер используется для генерации сигнала с помощью встроенного генератора с числовым программным управлением. Генератор с числовым программным управлением непрерывно отслеживает фазу и соответствующим образом регулирует частоту.

Резонансная частота LC-фильтра рассчитывается по приведённой ниже формуле [10]:

$$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}. \quad (1)$$

C_1 – эффективная ёмкость ультразвукового преобразователя;

L_1 – внешняя катушка индуктивности, включённая в последовательную цепь;

f_s – резонансная частота.

Ультразвуковая очистка представляет собой применение ультразвука высокой интенсивности, которая требует полуволновые преобразователи. Для применения в ультразвуковой очистке требуются резонансные частоты в диапазоне от 18 кГц до 45 кГц. Скорость звука в керамике PZT-4 составляет примерно 3200 м/с.

Половина длины волны преобразователя PZT4 будет варьироваться от 3,5 до 9 см. Резонансная частота будет равна f=V/λ=35,5 кГц, где V – скорость; f – резонансная частота; λ – длина волны.

Выводы. Предлагаемые авторами схемы ультразвукового генератора фильтра позволят повысить качество очистки масел, жидкостей и нефтепродуктов. Во время очистки жидкие загрязнения и мутность фильтрующих элементов являются важным фактором, определяющим время процесса очистки. Авторы статьи предлагают процесс очистки выполнять за счёт ультразвукового преобразователя в связке с ми-

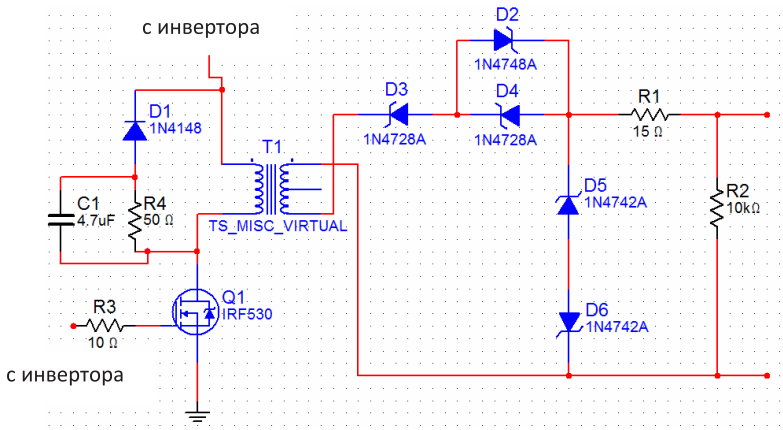


Рисунок 6 – Схема усилителя

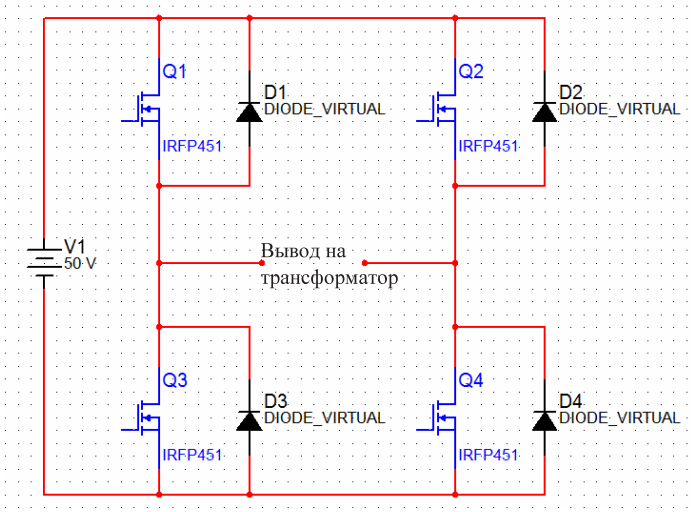


Рисунок 7 – Мостовой инвертор на полевых транзисторах

кроконтроллером PIC 16F630, рабочая частота которого составляла 30 кГц. Для обратной связи системы был применён датчик ультразвука HC-SR04, который необходим для контроля передачи преобразователем ультразвуковых колебаний.

Список источников

1. Петрик Д. Ю., Корнеев В. М., Петрик В. Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 73–77. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77.

2. Петрик Д. Ю., Корнеев В. М., Петрик В. Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 81–84. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84.

3. Соцкая И. М., Орлов П. С. Повышение ресурса работы фильтра для очистки жидкостей // Вестник АПК Верхневолжья. 2017. № 3 (39). С. 84–87. ISSN 1998-1635.

4. Орлов П. С., Соцкая И. М., Адакин Р. Д. Разработка программного обеспечения для управления процессом очистки отложений с поверхностей многоразового фильтра из синтетического полимерного материала ультразвуком // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74, № 7. С. 300–303. ISSN 0869-4931.

5. Пат. № 154484 Российская Федерация, МПК B01Д 29/11 (2006.01). Фильтр для очистки жидкостей // Орлов П. С., Соцкая И. М., Казакова А. Н., Мухарьямов М. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия». № 2014150714/05 ; заявл. 15.12.2014 ; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. 2 с.

6. Kifune H., Hatanaka Y., Nakaoka M. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 2004, Vol. 151, Is. 1. P. 19–25. DOI 10.1049/ip-epa:20040085.

7. Fujita H., Akagi H. Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Series-Resonant Inverter for Corona Discharge Processes // IEEE Transactions on Industry Applications. 1999, Vol. 35. P. 621–627.

8. Berlincourt D. Piezoelectric crystals and ceramics. In: Mattiat O.E., editor. Ultrasonic Transducer Materials. Plenum Press; New York, NY, USA: 1971. pp. 63–124.

9. Алехин В.А. Микроконтроллеры PIC: основы программирования и моделирования в интерактивных средах MPLAB IDE, mikroC, TINA, Proteus. Практикум. М. : ГЛТ, 2016. 248 с.

10. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М. : ДМК Пресс, 2009. 384 с. ISBN 978-5-94074-493-1.

References

1. Petrik D. Yu., Korneev V. M., Petrik V. Yu. Intensifikaciya processa ochistki detalej v pogruzhnyh moechnyh mashinah // Agroinzheneriya. 2022. T. 24, № 5. S. 73–77. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77.

2. Petrik D. Yu., Korneev V. M., Petrik V. Yu. Opredelenie optimal'nyh tekhnologicheskih parametrov processa ochistki detalej v pogruzhnyh moechnyh mashinah // Agroinzheneriya. 2023. T. 25, № 4. S. 81–84. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84.

3. Sotskaya I. M., Orlov P. S. Povyshenie resursa raboty fil'tra dlya ochistki zhidkostej // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. 2017. № 3 (39). S. 84–87. ISSN 1998-1635.

4. Orlov P. S., Sotskaya I. M., Adakin R. D. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya upravleniya processom ochistki otlozhenij s poverhnostej mnogorazovogo fil'tra iz sinteticheskogo polimernogo materiala ul'trazvukom // Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii. 2020. T. 74, № 7. S. 300–303. ISSN 0869-4931.

5. Pat. № 154484 Rossijskaya Federaciya, MPK V01D 29/11 (2006.01). Fil'tr dlya ochistki zhidkostej // Orlov P. S., Sockaya I. M., Kazakova A. N., Mukhar'yamov M. V. ; patentoobladatel' FGBOU VPO «YAroslavskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». № 2014150714/05 ; zayavl. 15.12.2014 ; opubl. 27.08.2015, Byul. № 24. 2 s.

6. Kifune H., Hatanaka Y., Nakaoka M. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 2004, Vol. 151, Is. 1. P. 19–25. DOI 10.1049/ip-epa:20040085.

7. Fujita H., Akagi H. Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Series-Resonant Inverter for Corona Discharge Processes // IEEE Transactions on Industry Applications. 1999, Vol. 35. P. 621–627.

8. Berlincourt D. Piezoelectric crystals and ceramics. In: Mattiat O.E., editor. Ultrasonic Transducer Materials. Plenum Press; New York, NY, USA: 1971. pp. 63–124.

9. Alekhin V. A. PIC microcontrollers: basic programming and simulation interactive environments MPLAB IDE, mikroC, TINA, Proteus. Workshop. M. : GLT, 2016. 248 p.

10. D'yakonov V. P. Generaciya i generatory signalov. M. : DMK Press, 2009. 384 s. ISBN 978-5-94074-493-1.

Сведения об авторах

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Ирина Марковна Соцкая – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 9559-1004.

Елена Владимировна Шешунова – кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 4860-1126.

Information about the authors

Artem S. Uglovsky – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 3717-5731.

Irina M. Sotskaya – Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Technical Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 9559-1004.

Elena V. Sheshunova – Candidate of Technical Sciences, Docent, Dean of the Faculty of Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 4860-1126.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.