

УДК 532.5.073

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В БАЗОВОМ СТЕНДЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

А. М. Сорокин, А. В. Бойко, А. П. Чупахин*, А. А. Черевко*

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: amsorokin@ngs.ru, boiko@itam.nsc.ru, chupakhin@hydro.nsc.ru, cherevko1@ngs.ru

Представлена система для автоматизированного исследования пульсирующих течений жидкости в каналах с помощью специального стенда. С использованием рассматриваемой системы в специально разработанной компьютерной программе задается пульсирующий расход жидкости, а также проводится контроль за выполнением задания. Стенд протестирован с использованием расходомера.

Ключевые слова: пульсирующие течения, каналы, гемодинамика, автоматизированный измерительный комплекс.

DOI: 10.15372/PMTF20200413

Введение. В работе [1] описан стенд для изучения пульсирующих течений жидкости. Подобные стенды используются, например, при решении различных проблем гемодинамики (см. [2–4]). При этом согласно [1] необходимо обеспечивать высокую повторяемость формы возмущений и надежность работы стенда с различными жидкостями в течение длительного времени. В настоящей работе описываются основные особенности системы управления стендом для решения указанных задач и обосновываются преимущества используемых решений по сравнению с существующими подходами. Также представлены результаты тестирования стенда в случае течения в круглой трубе.

Система управления. Рассматриваемая система управления создана с учетом опыта проведения гемодинамических исследований в Институте гидродинамики СО РАН [3–5] и опыта создания автоматизированных измерительных комплексов для аэродинамических исследований в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [6–8], хорошо зарекомендовавших себя в течение длительного времени эксплуатации (см., например, обзор работ в [9]).

Основной механической частью стенда (рис. 1) для изучения пульсирующих течений жидкости является гидравлический поршневой насос (помпа). Поршень перемещается с помощью ходового винта, вращение которого, в свою очередь, осуществляется с помощью

Разработка стенда выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 17-11-01156), монтаж и отладка — при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-01736).

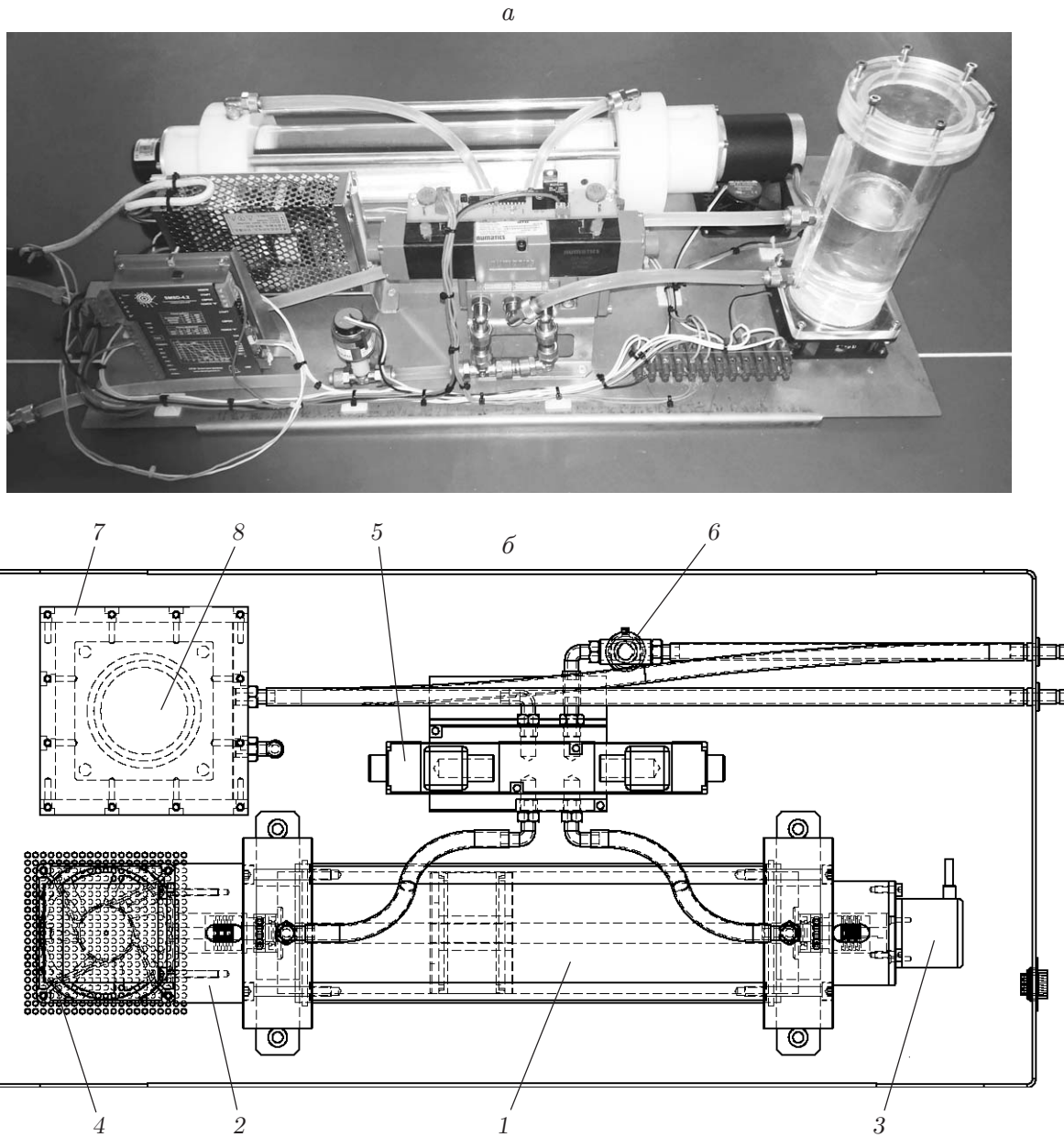


Рис. 1. Общий вид (*a*) и схема (*б*) стенда для исследования пульсирующих течений жидкости:

1 — помпа, 2 — шаговый двигатель, 3 — инкрементальный энкодер, 4 — электровентилятор, 5 — электромеханический клапан, 6 — датчик предельного давления, 7 — бак, 8 — электропривод

униполярного шагового двигателя FL57ST76, соединенного с ходовым винтом эластичной муфтой.

Управление шаговым двигателем осуществляется с использованием программируемого блока SMSD-4.2 научно-производственной фирмы “Электропривод” (Санкт-Петербург). В отличие от многих других блоков управления данный блок поддерживает три режима работы: контроллера в соответствии с программой, записываемой в энергонезависимую память блока; драйвера с набором стандартных управляющих сигналов с напряжениями 0 и 5 В; управления от встроенного потенциометра или внешнего аналогового сигнала и дополнительных сигналов “Реверс” и “Авария”.

Поскольку гидравлический поршневой насос предназначен для создания периодических пульсирующих течений жидкости, а величина пульсаций расхода жидкости непосредственно определяется скоростью перемещения поршня, в качестве наиболее эффективного как с технической точки зрения, так и с точки зрения финансовых затрат был выбран режим управления от внешнего аналогового сигнала. В этом режиме доступны все необходимые для решения поставленной задачи функции: изменение скорости вращения в зависимости от величины входного сигнала, автоматическое переключение направления вращения двигателя при поступлении сигнала от датчика реверса, автоматическая остановка двигателя при поступлении сигнала от аварийного датчика, возможность изменения величины дробления шага и крутящего момента.

В качестве источника управляющего аналогового сигнала могут быть использованы различные генераторы сигналов с диапазоном регулирования напряжения $0 \div 5$ В. Работа стенда тестировалась с помощью источника переменных сигналов произвольной формы QMBox45-8 фирмы “Р-Технолоджи”, разработанного для аналогового управления параметрами измерительного, тестового и технологического оборудования. Это устройство представляет собой 8-канальный 16-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с частотой преобразования 125 кГц и разрешающей способностью 0,5 мВ. Выходные каналы устройств серии QMBox45 могут работать в трех режимах: асинхронной записи, автогенератора и потокового вывода данных.

Режим асинхронной записи предназначен для получения постоянного напряжения. В этом режиме состояние каждого выхода устройства устанавливается и изменяется с помощью команд компьютера. Данный режим можно использовать для задания постоянной скорости перемещения поршня и соответственно постоянного расхода, что необходимо, например, при калибровке гидравлического поршневого насоса.

Режим автогенератора предназначен для получения простых периодических сигналов. В этом режиме перед началом работы с использованием прикладного программного обеспечения (ПО) загружаются данные во внутренний буфер устройства (размер буфера составляет 32 кслов/канал). После получения команды “Старт” от ПО устройство начинает в цикле через ЦАП выводить данные внутреннего буфера. Во время работы обновления данных внутреннего буфера не происходит. Этот режим работы является оптимальным для создания пульсирующих течений жидкости с периодически меняющимся расходом жидкости.

Режим потокового вывода данных позволяет генерировать непериодические сигналы произвольной формы и длительности, а также воспроизводить через ЦАП файлы произвольной длины. Во время работы в этом режиме данные во внутреннем буфере устройства постоянно обновляются. По мере вывода данных из внутреннего буфера через ЦАП прикладное ПО заполняет освободившуюся часть внутреннего буфера новыми данными из оперативной памяти компьютера. Поскольку ПО заполняет внутренний буфер данными со скоростью, превышающей скорость их вывода из буфера через ЦАП, сеанс передачи данных может продолжаться в течение неограниченного времени. При этом данные

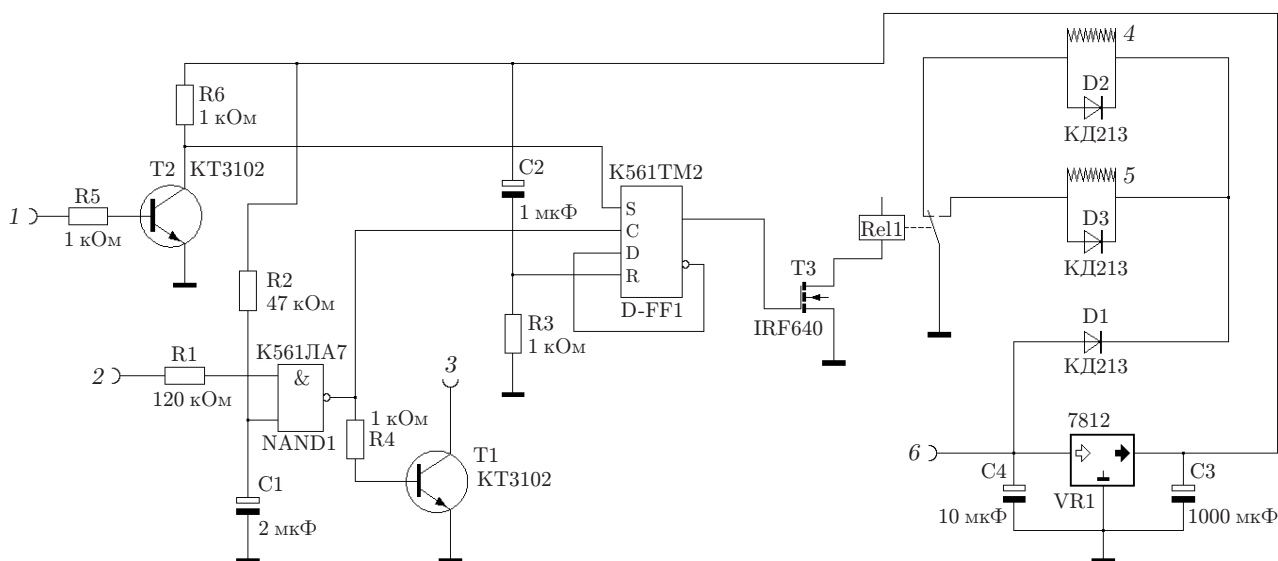


Рис. 2. Электрическая схема триггера управления электромеханическими клапанами:

1 — вход, 2 — датчик положения поршня, 3 — реверс, 4 — обмотка клапана 1, 5 — обмотка клапана 2, 6 — входное напряжение (24 В)

из памяти компьютера выводятся через ЦАП непрерывно. Этот режим работы является универсальным и может использоваться для создания пульсирующих течений жидкости с произвольно меняющимся расходом жидкости.

Для формирования в рабочем канале стенда непрерывного течения жидкости с постоянным направлением использовался блок электромеханических клапанов серии Mark 8 типа 225-239В фирмы ASCO Numatics. В момент смены направления движения поршня происходит переключение электромеханических клапанов, при котором входной и выходной штуцеры помпы меняются местами. Для определения крайних положений поршня изготавливались бесконтактные концевые выключатели на основе нормально разомкнутых герконовых переключателей. Состояние концевых выключателей изменяется при приближении к ним неодимового магнита, расположенного в центральном сечении поршня.

Электрическая схема триггера управления электромеханическими клапанами показана на рис. 2. Переключение герконовых переключателей сопровождается дребезжанием, для подавления которого в схеме управления электромеханическими клапанами используется формирователь сигнала прямоугольной формы, состоящий из RC-цепи и логического элемента “И-НЕ” (реализованного на микросхеме типа К561JA7) в качестве компаратора. Далее отфильтрованный сигнал подается на триггер (реализованный на микросхеме типа К561TM2), работающий в режиме делителя частоты на два, а также на блок управления шаговым двигателем. Тем самым на блок управления двигателем подается сигнал “Реверс”. Выходной сигнал микросхемы К561TM2 управляет полевым транзистором, нагрузкой которого является реле, коммутирующее электромеханические клапаны. При нажатии кнопки “Старт” сигнал одновременно подается на блок управления двигателем и на вход микросхемы К561TM2, что приводит к формированию на ее выходе напряжения величиной 5 В, тем самым задаются начальное положение клапанов и начальное направление движения поршня.

Для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с превышением допустимого давления внутри помпы и гидравлических магистралей, на выходе электромеханических клапанов установлен регулируемый датчик предельного давления W117G-5H-C52L-DIS

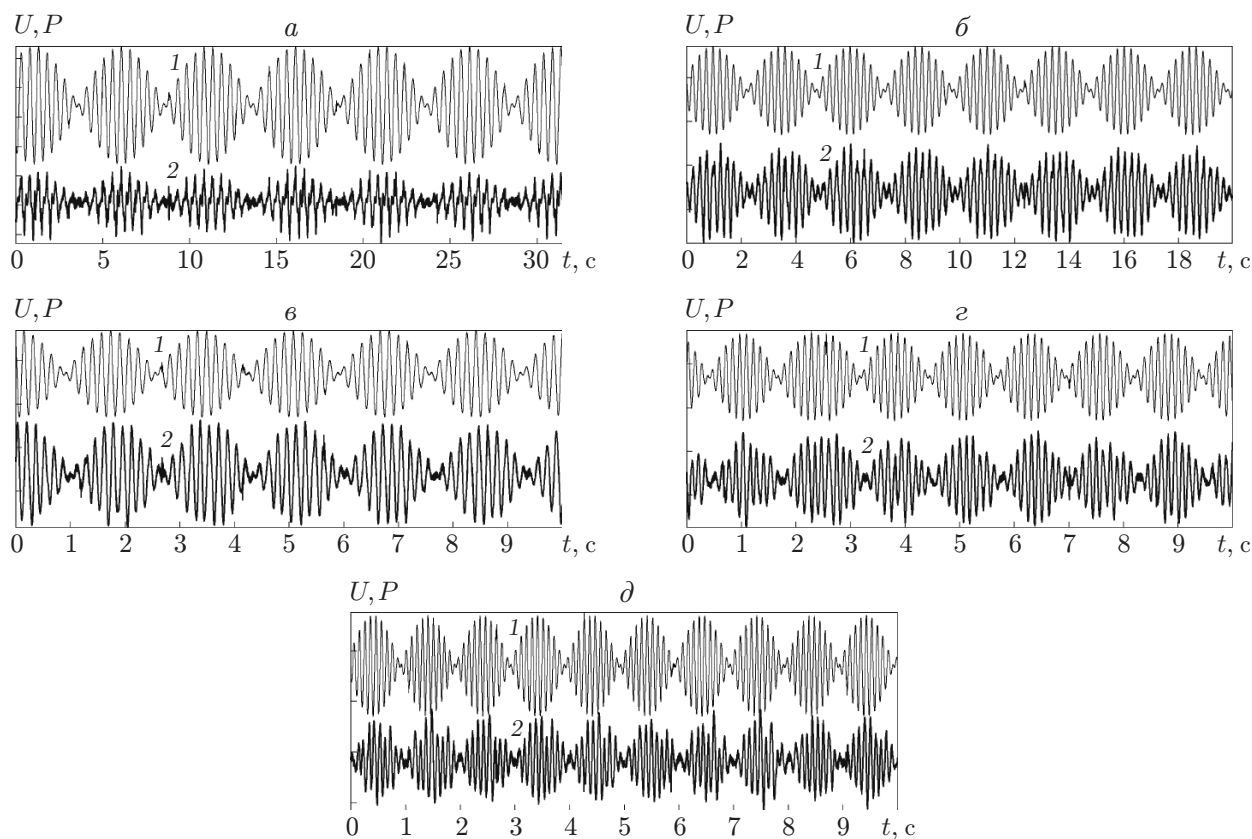


Рис. 3. Зависимости напряжения опорного сигнала U (1) и давления P (2) от времени при различных значениях частоты модуляции:
 a — $\omega = 2$ Гц, $б$ — $\omega = 4$ Гц, $в$ — $\omega = 6$ Гц, $г$ — $\omega = 8$ Гц, $д$ — $\omega = 10$ Гц

фирмы Agoflex, значение предварительно устанавливаемого предельного давления которого можно варьировать в диапазоне $0 \div 300$ кПа. Выход датчика подключен непосредственно к входному сигналу “Авария” блока управления шаговыми двигателями.

Для контроля за перемещением поршня в конструкции помпы установлен инкрементальный энкодер E40S6-1000-3-T-5 с разрешением 1000 шаг/об фирмы Autonics. Такая точность достаточна для целей данной работы, так как превышает число шагов двигателя при любом режиме его работы, обеспечиваемом контроллером. Инкрементальный энкодер с помощью эластичной муфты крепится непосредственно к хвостовику ходового винта. Цифровой сигнал с энкодера может подаваться в отдельную аппаратно-программную систему контроля перемещения, позволяя отслеживать фактическое положение поршня, скорость его перемещения и при необходимости корректировать их.

Тестирование. Для проверки работоспособности стенда и системы управления им проведены первые тестовые испытания. С помощью источника переменных сигналов QMBox45-8 на вход блока управления шаговыми двигателями SMSD-4.2 подавался аналоговый сигнал, задающий скорость перемещения поршня в гидравлической помпе. Управляющий аналоговый сигнал, форма которого показана на рис. 3 линией 1, представляет собой гармонический сигнал с частотой 0,2 Гц с наложенной гармонической амплитудной модуляцией различных частот $\omega = 2, 4, 6, 8, 10$ Гц. С помощью датчика давления, установленного в разрыв рабочего канала, измерялись параметры пульсирующего течения. На рис. 3 линией 2 показана временная зависимость давления в рабочем канале. Качественное совпадение формы пульсаций течения и управляющего сигнала подтверждает

работоспособность как самого стенда, так и предложенной системы управления им, по крайней мере до значения частоты модуляции $\omega = 10$ Гц. Заметим, что на использовавшемся ранее устройстве [3] не всегда удавалось получать значения частоты пульсаций потока, превышающие 2 Гц. Для проведения дальнейших испытаний автоматизированной системы управления потоком на базовом стенде для исследования пульсирующих течений жидкости предполагается получить зависимости не только давления жидкости в рабочем канале, но и массового расхода жидкости и угловой скорости вращения ходового винта.

Заключение. Разработана, изготовлена и протестирована система управления базовым стендом для изучения пульсирующих течений жидкости, по техническим характеристикам не уступающим, а по частотным характеристикам превосходящим существующий аналог [3]. В частности, показано, что стенд, оснащенный данной системой управления, позволяет в течение неограниченного времени моделировать пульсирующие течения сложной формы и с высокой повторяемостью, что способствует увеличению надежности и точности получаемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин А. М., Бойко А. В., Тулупов А. А., Чупахин А. П. Базовый стенд для исследования пульсирующих течений жидкости // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 6. С. 211–215.
2. Frayne R., Holdsworth D. W., Gowman L. M., et al. Computer-controlled flow simulator for MR flow studies // J. Magnet. Resonance Imaging. 1992. V. 2, N 5. P. 605–612.
3. Бойко А. В., Акулов А. Е., Чупахин А. П. и др. Измерение скорости потока вязкой жидкости и его визуализация двумя магниторезонансными сканерами // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 2. С. 26–31.
4. Хе А. К., Черевко А. А., Чупахин А. П. и др. Мониторинг гемодинамики сосудов головного мозга // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 5. С. 7–16.
5. Denisenko N. S., Chupakhin A. P., Khe A. K., et al. Experimental measurements and visualisation of a viscous fluid flow in Y-branching modelling the common carotid artery bifurcation with MR and Doppler ultrasound velocimetry // J. Phys: Conf. Ser. 2016. V. 722. P. 012013.1–012013.8.
6. Грек Г. Р., Бойко А. В., Гилев В. М. и др. Автоматизированное управление координатным устройством аэродинамической трубы // Междунар. журн. эксперим. образования. 2013. № 11. С. 155–156.
7. Бойко А. В., Гилев В. М., Грек Г. Р. и др. Создание координатного устройства для аэродинамической трубы // Юж.-Сиб. науч. вестн. 2014. № 1. С. 13–16.
8. Грек Г. Р., Бойко А. В., Гилев В. М. и др. Автоматизированная система сбора термоанемометрической информации в аэрофизическом эксперименте // Междунар. журн. прикл. фундам. исслед. 2014. № 5. С. 11–14.
9. Бойко А. В., Довгаль А. В., Козлов В. В. Неустойчивость отрывного течения за двумерными элементами неровности поверхности в низкоскоростном воздушном потоке (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 171–178.

*Поступила в редакцию 27/І 2020 г.,
после доработки — 27/І 2020 г.
Принята к публикации 27/І 2020 г.*