

Введение Разработка установок для поверки средств измерений артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) является важной научно-практической задачей. Особую значимость она приобретает с учетом комплексного подхода к оценке качества медицинских приборов, одновременно и взаимосвязано воспроизводя единицы АД и ЧСС, что существенно выделяет ее среди остальных аналогов в данной области измерений [1]. Подходы к построению моделей, учитывающих такую особенность, должны базироваться на взаимосвязанных оценках параметров АД и ЧСС. Одним из таких подходов является построение замкнутого колебательного контура для исследования пульсовых колебаний потока жидкости. Моделирование процессов и оценка динамических свойств в этом случае приобретают особое значение. Целью работы является построение имитационной модели пульсирующих потоков жидкости в замкнутом гидравлическом контуре поверочных установок средств измерений артериального давления и частоты сердечных сокращений.

Построение моделей отдельных элементов, входящих в состав гидравлического контура, а также оценка их динамических свойств, была проведена в библиотеке SimHydraulics среды Matlab Simulink. Устройство и принцип работы установки

Установка для поверки измерителей АД (рис. 1) представляет собой гидравлический замкнутый контур, в который измеряемые параметры давления P и частоты пульса f подаются с блока управления 18 на источник пульсаций давления, выполненный в виде насоса 2 и устройство генерации колебаний потока жидкости 1 (пульсатор расхода), создающий модулированный сигнал по амплитуде и частоте и установленный в точке разветвления трубопровода и байпасной линии. При этом колебания происходят на параллельных участках гидравлического тракта колебательного контура, которые образуют измерительный 8 и байпасный 9 каналы соответственно. Рис. 1 – Схема поверочной установки измерителей АД

Для сглаживания пульсационных характеристик от регулируемого гидравлического насоса 2 установлен демпфер 5, выполненный в виде герметичного цилиндра. Регулирование расхода жидкости на входе в гидравлический контур осуществляется клапаном 4, установленный в байпасной линии 3. Счетчик расхода жидкости 6 позволяет осуществлять визуальный контроль генерируемого расхода в гидравлический контур. Частота пульсаций в измерительном и байпасном каналах обуславливается скоростью вращения ротора в пульсаторе 1, а амплитуды – величиной расхода в момент перекрытия выходных окон статора вращающимся ротором [2]. Измерительный модуль 10, включенный в измерительный канал 8, представляет собой сенсорный участок в виде эластичного цилиндра 11, в котором размещена эластичная трубка 12, имитирующая сосуды верхней конечности [3]. Контроль давления в измерительном модуле осуществляется рабочим эталоном давления 15, представляющими собой датчик избыточного давления МИДА с верхним пределом измерений 40 кПа и погрешностью 0,15%.

Поддержание стабильных параметров давления в измерительном модуле 10, используемом для поверки цифровых ИАД 14 с манжетой на плечо 13, осуществляется регулятором давления 16, а во всей измерительной системе – регулятором 17. При моделировании пульсовых колебаний в каналах поверочной установки будем исходить из следующих допущений: 1) течение жидкости в гидравлическом контуре будем полагать одномерным, поток жидкости характеризуется только средними по контрольному сечению значениями величин; 2) участки гидравлического тракта колебательного контура выполнены круглого сечения с жесткими стенками; 3) время, за которое усредняются рассматриваемые величины, должно быть много больше времени единичного сокращения; 4) жидкость будем считать несжимаемой, ее параметры считаются постоянными. Видно, что введение таких допущений связано с внесением систематических и случайных составляющих методической погрешности. Однако на первой этапе принятая модель вполне приемлема для проведения самого общего анализа вопросов, касающихся измерений АД и ЧСС.

Имитационная модель колебательного контура поверочной установки Для численного расчета параметров пульсирующих потоков жидкости в гидравлических каналах поверочной установки измерителей артериального давления на основании схемы, приведенной на рис. 1, составлена обобщенная модель колебательного контура поверочной установки. В модель, представленную на рис. 2, включены дополнительно два датчика расхода и давления, по результатам которых можно судить о переходных процессах, протекаемых в гидравлическом контуре. Данные блок-схемы выполнены в библиотеке SimHydraulics системы моделирования Simulink среды Matlab. Блок Variable Head Two-Arm Tank представляет собой резервуар с жидкостью вместимостью 2 л, создающий давление в гидравлической системе, равным 850 Па (6,4 мм рт.ст.), при этом нагнетание давления остается постоянным и не зависит от изменения ее объема. Рис. 2 – Блок-схема, моделирующая пульсовые колебания в замкнутом контуре поверочной установки В качестве рабочей жидкости выступает дистиллированная вода, параметры которой устанавливаются блоком Hydraulic Fluid. Он определяет гидравлические свойства жидкости, как, например, кинематическая вязкость, плотность, модуль объемной упругости для всех гидравлических блоков колебательного контура. Гидравлический насос с компенсацией давления Variable-Displacement Pressure-Compensated Pump осуществляет подачу рабочей жидкости в гидравлический контур. К основным параметрам, необходимым для задания параметров насоса, относятся, например, максимальное перемещение жидкости, диапазон регулирования, номинальное давление, угловая скорость и др. Все эти параметры задаются насоса в качестве исходных данных для его моделирования. В данном блоке необходимо установить следующие характеристики: 1) номинальное давление 10 кПа; 2) диапазон регулирования

давления – до 10 кПа; 3) КПД насоса 0,85; 4) номинальная угловая скорость 2 рад/с. Остальные характеристики устанавливаются по умолчанию. При моделировании работы насоса пренебрегают сжимаемостью жидкости, силой трения и инерционной нагрузкой на вал насоса. Подключение S насоса является механическим портом, связанным с приводным валом насоса. Блок работает в положительном направлении от порта T к порту P, если вал вращается в положительном направлении. Блок Ideal Angular Velocity Source представляет собой идеальный источник угловой скорости. Соединения R и C являются механическими портами. Порт S обеспечивает физический сигнал, с помощью которого осуществляется управление работой насоса, при этом относительная скорость вращения вала насоса прямо пропорциональна сигналу с порта управления S. Количество поступающей жидкости в колебательный контур фиксируется счетчиком, представленным блоком Hydraulic Flow Rate Sensor и установленным в месте соединения насоса и пульсатора расхода Пульсатор расхода (Pulsator) выполнен в виде подсистемы, генерирующей пульсовые колебания в гидравлическом контуре, причем выходные характеристики импульсов генерируемого расхода полностью зависят от геометрических размеров выходных окон ротора и статора. Структурная схема пульсатора расхода приведена на рис. 3. Рис. 3 – Подсистема Pulsator, моделирующая генерацию колебаний На рис. 3 введены обозначения: A1 — блок, моделирующий изменение площади выходного окна статора, связанного с байпасным каналом гидравлического контура; B1 — блок, моделирующий изменение площади выходного окна статора, связанного с измерительным каналом гидравлического контура; A2, B2 — блоки, моделирующие выходные окна ротора; P — давление, поступающее на вход пульсатора; S – входной физический сигнал, управляющий работой ротора; A — выходной измерительный канал; B — выходной байпасный канал. Площадь выходных окон статора составляет $S_{ст} = 7,5 \text{ мм}^2$, ротора $S_{ст} = 15 \text{ мм}^2$. Максимальный расход жидкости в выходных каналах достигается при полном совмещении одного из окон ротора с окном статора, а минимальный – при полном перекрытии окна статора. Таким образом, создание пульсирующего потока жидкости в гидравлических каналах осуществляется в противофазе. Для введения такой особенности подсистемы введен блок усиления PS Gain, значение которого установлено -1. Управление работой совмещений выходных окон блоков A1 и B1 соответственно блоками A2 и B2 осуществляется блоком задания косинусоидального сигнала Sine Wave, установленного на входе подсистемы Pulsator. Возможные границы изменения площади перекрытий окон статора установлены блоками PS Saturation. Вращение ротора в пульсаторе осуществляется шаговым двигателем, управляемым блоком управления. Подсистема Shunt Motor, встроенная в библиотеку SimElectronics, моделирует работу данного двигателя. Выходные каналы A и B содержат обратные клапаны Check Valve, служащие для направления потока жидкости. Это позволяет

использовать обособленно результаты измерения параметров пульсирующего потока в гидравлических каналах колебательного контура. Модели блока построены на основе стандартных параметров таких, как максимальная площадь перекрытия, давление при максимальном открытии клапана, гидравлический коэффициент расхода и т.д. В выходных каналах А и В установлены средства измерения давления и расхода Hydraulic Pressure Sensor и Hydraulic Flow Rate Sensor соответственно, числовые значения которых выводятся в блок Scope, служащий для вывода результатов моделирования в отдельном окне. На выходе измерительного и байпасного каналов через гидравлическое сопротивление (тройник) T-junction установлен шаровой кран Ball Valve, от степени открытия которого зависит давление в колебательном контуре поверочной установки. Таким образом, все параметры гидравлической системы (рис. 1), определяющие её динамику, передаются динамической модели. SimHydraulics автоматически формирует систему дифференциальных уравнений движения жидкости (она является внутренним объектом, скрытым от пользователя). Запуск модели на выполнение обеспечивает интегрирование системы дифференциальных уравнений и воспроизведение во времени параметров всех ее элементов (рис. 2). Результаты моделирования Результаты моделирования процессов в измерительном и байпасном каналах получены с помощью блока Scope. На рис. 4 в качестве примера приведены диаграммы импульсов генерируемого расхода и давления в колебательном контуре во второй контрольной точке ($P_2 = 10$ кПа) при частоте колебаний 2 Гц. На рис. 4 изображены: в первом окне — форма генерируемых импульсов расхода жидкости в измерительном канале (flow rate 1), мм³/с; во втором окне — форма генерируемых импульсов расхода жидкости в байпасном канале (flow rate 2), мм³/с; в третьем окне — изменение давления в измерительном канале (pressure 1), Па; в четвертом окне — изменение давление в байпасном канале (pressure 2), Па. Аналогично можно получить результаты моделирования и при других контрольных значениях, позволяющих более полно оценить метрологические свойства данной модели. В табл. 1 сведены численные результаты расчета параметров, определяющих качество представленной модели. Таблица 1 – Основная погрешность АД в измерительном канале в результате моделирования

Номинальное давление в каналах колебательного контура, кПа	Средний расход жидкости, мл/с	Предел допускаемой погрешности измерения АД в абсолютном выражении, Па	Предел допускаемой погрешности измерения АД в относительном выражении, %
5	6,68	4	0,08
10	9,10	7	0,07
20	12,25	15	0,08
30	14,45	20	0,07
40	16,18	25	0,06

По результатам численного расчета параметров пульсирующих потоков жидкости в гидравлических каналах поверочной установки установлено, что погрешность измерения давления не превышает 0,15%, что соответствует требованиям, предъявляемым к поверочным установкам измерителей АД [5,6]. Рис. 4 – Результаты моделирования Выводы В работе предложена имитационная модель

колебательного контура поверочной установки измерителей артериального давления, построенная в среде Matlab Simulink, которая позволяет с достаточной точностью решать задачу численного расчета параметров пульсирующих потоков жидкости в гидравлических каналах поверочной установки измерителей артериального давления. Представленная модель позволяет проанализировать форму и амплитуду импульсов генерируемого расхода в гидравлической системе, а также дает оценку ее динамических свойств в измерительном и байпасном каналах. Показано, что погрешность измерения давления в гидравлическом контуре не противоречит требованиям, заложенным международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ) в данной области измерений ($\delta p \leq 0,15\%$). Рассмотренная имитационная модель колебательного контура, а также результаты численного расчета параметров ее гидравлических элементов позволяют сделать вывод об ее пригодности при проектировании установок для комплектной автоматизированной поверки измерителей АД.