

КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КАНАЛА ДАВЛЕНИЯ ПОВЕРОЧНОЙ УСТАНОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЧАСТОТЫ ПУЛЬСА

*Сойко Алексей Игоревич
к.т.н., доцент КНИТУ-КАИ, г. Казань
E-mail: alexsoiko@rambler.ru*

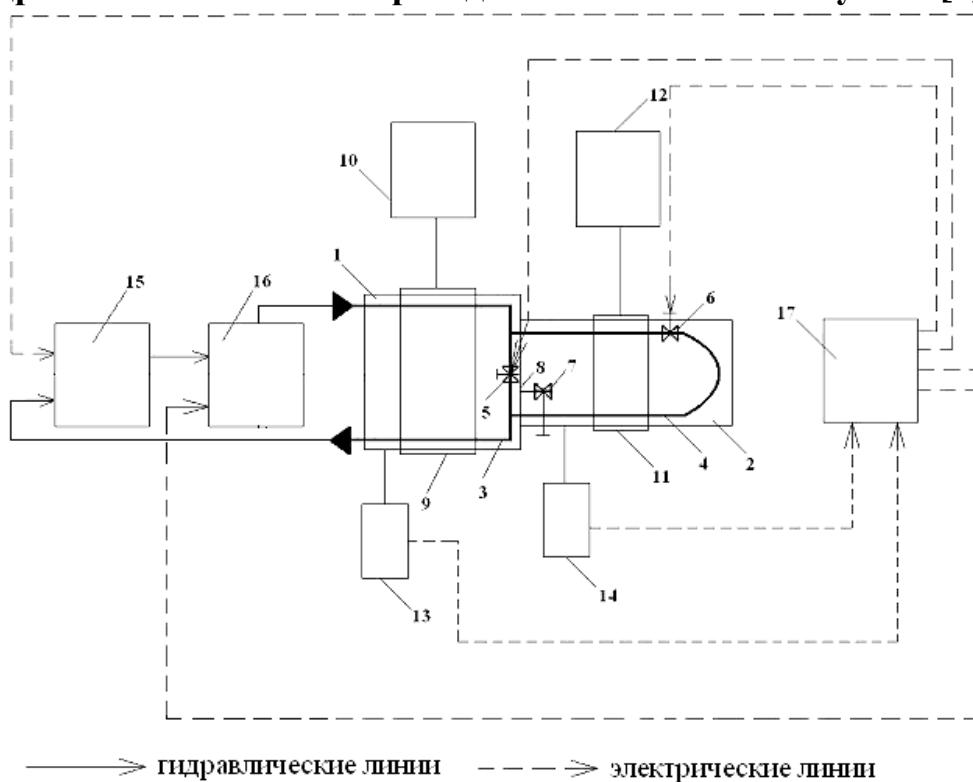
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-6303.2010.8.

Качество измерения артериального давления во многом определяется характеристиками широко используемых в повседневном быту простейших цифровых измерительных приборов артериального давления (ИАД) [4, с. 18]. Для оценки точности их измерений была разработана поверочная установка на базе гидравлического имитатора давления и частоты пульса, позволяющего одновременно и взаимосвязано осуществлять передачу размера единиц давления и частоты пульса цифровым измерительным приборам артериального давления, а также проводить комплектную поверку таких приборов как с плечевыми, так и с запястными манжетами.

Схема установки приведена на рисунке 1. Гидравлический имитатор давления и частоты пульса состоит из двух измерительных модулей 1 и 2, выполненных в виде цилиндров, в которых размещены эластичные трубы 3 и 4, имитирующие соответственно плечевую артерию и артерию на запястье руки человека. Измерительный модуль 1 используется для поверки цифровых ИАД 10 с манжетами на плечо 9, измерительный модуль 2 – для поверки цифровых ИАД 12 с манжетами на запястье 11. Измерительные модули 1 и 2 разделены между собой непроницаемой перегородкой 8, в которой установлен соединительный запорно-регулирующий элемент 7, выполняющий функцию гидравлического объединения двух модулей, выравнивая соответствующие давления в них для более точной передачи пульсаций рабочей жидкости на компрессионные манжеты поверяемых средств измерений.

Блоком управления 17 задаются требуемые значения давления и частоты. Сформированный сигнал поступает на вход насоса 15 и генератора переменного расхода 16 [1], с помощью которых в эластичную трубку 3 первого измерительного модуля нагнетается рабочая жидкость с заданными давлением и частотой пульсаций. Регулирование расхода рабочей жидкости в трубке 3 осуществляется запорно-регулирующим элементом 5, а в трубке 4 – запорно-регулирующим элементом 6.

Рисунок 1. Установка для комплектной поверки ИАД с гидравлическим имитатором давления и частоты пульса [2]



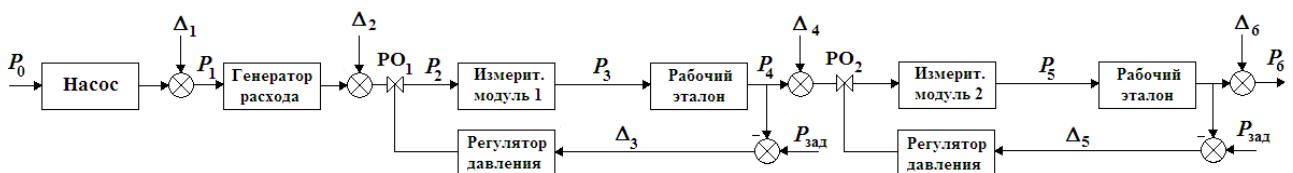
Контроль давления в измерительных модулях 1 и 2 осуществляется рабочими эталонами давления и частоты 13 и 14, представляющими собой датчик избыточного давления МИДА с верхним пределом измерений 40 кПа и погрешностью 0,15% и частотомер ЧЗ-63/1 с погрешностью $\pm 5 \cdot 10^{-7}$. Поддержание стабильных параметров давления в измерительных модулях 1 и 2 осуществляются регуляторами давления 5, 6 и 7 соответственно.

Данная установка позволяет за одну операцию поверки сличить в точке показания поверяемого ИАД с манжетой на плечо ($P_{\text{e}1}, P_{\text{h}1}, f_1$) и/или ИАД с манжетой на запястье ($P_{\text{e}2}, P_{\text{h}2}, f_2$) с эталонными значениями ($P_{\text{e}01}, P_{\text{h}01}, f_{01}$) и ($P_{\text{e}02}, P_{\text{h}02}, f_{02}$), воспроизводимыми рабочими эталонами давления и частоты 13 и 14 соответственно.

Целью настоящей работы является теоретический анализ точности поверочной установки с гидравлическим имитатором давления и частоты пульса для одновременной и взаимосвязанной передачи размера единиц давления измерительным приборам с плечевыми и запястными манжетами.

Теоретическая оценка точности и анализ погрешности измерительных каналов поверочных установок представлены с позиции рассмотрения статических характеристик гидравлически связанных звеньев, входящих в ее состав (рисунок 2).

Рисунок 2. Структурная схема измерительного канала давления поверочной установки измерителей артериального давления с манжетами на плечо и запястье



На рис. 2 введены следующие обозначения:

$\text{РО}_1, \text{РО}_2$ – регулирующие органы для изменения расхода жидкости;

P_0 – начальное давление, задаваемое с блока управления;

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ – выходные параметры давления рассматриваемых звеньев;

$P_{\text{зад}}$ – заданное значение регулируемой переменной, которое должно поддерживаться регулятором;

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$ – погрешности звеньев, приведенных к их выходу, при этом Δ_3 и Δ_5 – сигналы рассогласования (ошибки) первого и второго измерительного модуля, определяемые как:

$$\begin{cases} \Delta_3 = P_{\text{зад}} - P_4 \\ \Delta_5 = P_{\text{зад}} - P_6 \end{cases}.$$

Выходная величина каждого отдельно взятого звена может быть представлена в виде:

$$P = P_{\text{ном}} + \Delta_p, \quad (1)$$

где $P_{\text{ном}}$ – часть выходного сигнала, определяемого входной величиной и номинальной функцией преобразования;

Δ_p – абсолютная погрешность на выходе отдельного преобразователя.

Давление, создаваемое насосом, можно представить в виде:

$$P_1 = P_{1\text{ном}} + \Delta_1 = K_h \cdot P_0 + \Delta_1, \quad (2)$$

где $K_h = \partial P_1 / \partial P_0$ – коэффициент преобразования звена;

Δ_1 – погрешность, определяемая характеристиками насоса.

Учитывая, что погрешность предыдущего звена учитывается на погрешности последующих звеньев, можно получить выражения для расчета выходного давления каждого последующего звена, входящего в состав поверочной установки [3, с. 28]. Так, результат измерения давления на выходе генератора расхода можно определить как:

$$P_2 = P_{2\text{ном}} + K_e \cdot \Delta_1 + \Delta_2 = K_h \cdot K_e \cdot P_0 + \frac{\partial P_2}{\partial P_1} \cdot \Delta_1 + \Delta_2, \quad (3)$$

где $K_e = \partial P_2 / \partial P_1$ – коэффициент преобразования генератора расхода;

Δ_2 – погрешность на выходе генератора расхода.

По аналогии запишем результат измерения давления на выходе первого измерительного модуля для поверки ИАД с манжетами на плечо, при этом учитываем, что к последовательному соединению измерительного модуля и рабочего эталона давления параллельно включен регулятор давления. Получим:

$$P_4 = \frac{K_h \cdot K_e \cdot K_{m1} \cdot K_{s1}}{1 + K_{m1} \cdot K_{p1} \cdot K_{s1}} \cdot P_0 + \frac{\partial P_4}{\partial P_1} \Delta_1 + \frac{\partial P_4}{\partial P_2} \Delta_2 + \frac{(\partial P_4 / \partial P_2)(P_{\text{зад}} - P_4)}{1 + (\partial P_4 / \partial P_2)[(P_{\text{зад}} - P_4) / P_4]} + \Delta_4, \quad (4)$$

где $K_{m1} = \partial P_3 / \partial P_2$ – коэффициент преобразования первого измерительного модуля;

$K_{\vartheta_1} = \partial P_4 / \partial P_3$ – коэффициент преобразования первого рабочего эталона давления;

$K_{p1} = \frac{\Delta_3}{P_4} = \frac{P_{зад} - P_4}{P_4}$ – коэффициент преобразования регулятора расхода,

который обеспечивает стабильное поддержание давления в измерительном модуле 1;

$\Delta_4 = \frac{\gamma_1 \cdot P_N}{100\%}$ – погрешность первого рабочего эталона давления,

где γ_1 – класс точности рабочего эталона давления;

P_N – нормирующее значение рабочего эталона давления.

Давление на выходе второго рабочего эталона давления P_6 измерительного модуля для поверки ИАД с манжетой на запястье запишется в виде:

$$P_6 = \frac{K_h \cdot K_e \cdot K_{m1} \cdot K_{\vartheta_1} \cdot K_{m2} \cdot K_{\vartheta_2}}{(1 + K_{m1} \cdot K_{\vartheta_1} \cdot K_{p1})(1 + K_{m2} \cdot K_{\vartheta_2} \cdot K_{p2})} \cdot P_0 + \frac{\partial P_6}{\partial P_1} \Delta_1 + \frac{\partial P_6}{\partial P_2} \Delta_2 + \\ + \frac{(\partial P_6 / \partial P_2)(P_{зад} - P_4)}{1 + (\partial P_4 / \partial P_2)[(P_{зад} - P_4) / P_4]} + \frac{\partial P_6}{\partial P_4} \frac{\gamma_1 \cdot P_N}{100} + \frac{(\partial P_6 / \partial P_4)(P_{зад} - P_6)}{1 + (\partial P_6 / \partial P_4)[(P_{зад} - P_6) / P_6]} + \Delta_6, \quad (5)$$

где $K_{m2} = \partial P_5 / \partial P_4$ – коэффициент преобразования второго измерительного модуля;

$K_{\vartheta_2} = \partial P_6 / \partial P_5$ – коэффициент преобразования второго рабочего эталона давления;

$K_{p2} = \frac{\Delta_5}{P_6}$ – коэффициент преобразования регулятора расхода второго измерительного модуля.

$\Delta_5 = \frac{\gamma_2 \cdot P_N}{100}$ – погрешность второго рабочего эталона давления;

γ_2 – класс точности второго рабочего эталона давления.

Таким образом, из (5) выразим номинальное давление на выходе измерительного канала давления гидравлического имитатора для поверки ИАД с манжетами на плечо и запястье:

$$P_{ном} = \frac{K_h \cdot K_e \cdot K_{m1} \cdot K_{\vartheta_1} \cdot K_{m2} \cdot K_{\vartheta_2}}{(1 + K_{m1} \cdot K_{\vartheta_1} \cdot K_{p1})(1 + K_{m2} \cdot K_{\vartheta_2} \cdot K_{p2})} \cdot P_0. \quad (6)$$

Погрешность измерительного канала давления при последовательном соединении измерительных модулей 1 и 2 (рис. 2) запишется в виде:

$$\Delta_p = \frac{\partial P_6}{\partial P_1} \Delta_1 + \frac{\partial P_6}{\partial P_2} \Delta_2 + \frac{(\partial P_6 / \partial P_2)((P_{\text{зад}} - P_4))}{1 + (\partial P_4 / \partial P_2)[(P_{\text{зад}} - P_4)/P_4]} + \frac{\partial P_6}{\partial P_4} \frac{\gamma_1 \cdot P_N}{100} + \\ + \frac{(\partial P_6 / \partial P_4)(P_{\text{зад}} - P_6)}{1 + (\partial P_6 / \partial P_4)[(P_{\text{зад}} - P_6)/P_6]} + \frac{\gamma_2 \cdot P_N}{100} \quad (7)$$

Таким образом, выражения (6) – (7) позволяют определить номинальное давление, а также произвести оценку погрешности измерительного канала давления поверочной установки на базе гидравлического имитатора давления и частоты с последовательным расположением измерительных модулей для поверки ИАД с плечевыми и запястными манжетами.

Поскольку регуляторы давления обеспечивают поддержание регулируемой переменной на заданном уровне при колебаниях возмущающих воздействий в определённых пределах, регулирование давления в измерительных модулях осуществляется до практически полного устранения ошибки, полагаем $\Delta_3 = 0$ и $\Delta_5 = 0$.

Переходя к относительной форме записи формулы (7), получим формулу для определения погрешности канала давления в виде:

$$\delta_p = \frac{\partial P_6}{\partial P_1} \delta_{P_1} + \frac{\partial P_6}{\partial P_2} \delta_{P_2} + \left(\frac{\partial P_6}{\partial P_4} + 1 \right) \delta_{P_3}, \quad (8)$$

где δ_{P_3} – относительная погрешность используемого эталона давления (при $\gamma_1 = \gamma_2$).

Для учета всех перечисленных составляющих погрешности канала давления (без учета их знака) запишем его относительную погрешность (8) в следующем виде:

$$\delta_p = \sqrt{\left(\frac{\partial P_6}{\partial P_1} \delta_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_6}{\partial P_2} \delta_{P_2} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial P_6}{\partial P_4} + 1 \right) \delta_{P_3} \right)^2} \leq 0,25\% \quad (9)$$

Формула (9) дает максимально возможную оценку погрешности канала давления установки для поверки ИАД с манжетами на плечо и на запястье. Наибольший вклад в погрешность δ_p вносит последнее слагаемое,

обусловленное инструментальной составляющей погрешностью измерения артериального давления. Влияние первых двух составляющих мало ввиду компенсации давления в измерительных модулях 1 и 2. Данная погрешность в вероятностном смысле ограничена сверху предельным значением $\delta_p \leq 0,25\%$, регламентирована требованиями нормативных документов для поверки ИАД и включает в себя, во-первых, допускаемую погрешность применяемых эталонов давления, во-вторых, суммирование погрешностей измерительных модулей на плечо и на запястье при последовательном их расположении.

Список литературы:

1. Генератор переменного расхода жидкости (варианты): пат. № 2318190 Рос. Федерации. № 2006108275/28; заявл. 07.03.06; опубл. 20.02.2008, Бюл. №6.
2. Имитационная модель руки человека для поверки средств измерения артериального давления и частоты сердечных сокращений: пат. № 2405423 Рос. Федерации. № 2009123052/14; заявл. 16.06.09; опубл. 10.12.10, Бюл. №34.
3. Сойко А.И. Анализ точности измерений установок для поверки измерителей артериального давления и частоты пульса // Медицинская техника, №3, 2011. С. 27-33
4. Сойко А.И., Каратаев Р.Н. Проверочные установки измерителей артериального давления с использованием генераций пульсирующих потоков: монография. Казань: Отечество, 2009 – 132 с.