

# Погрешность измерений в замкнутой системе управления расходом воды

Жалу Ахмад Пракоса

Научно-исследовательский центр физики,  
Индонезийский институт наук  
Тангеранг Селатан, Индонезия  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Россия, Санкт-Петербург  
jalu001@lipi.go.id

А. В. Путов, А. Д. Стоцкая

Кафедра систем автоматического управления,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Россия, Санкт-Петербург  
adstotskaya@etu.ru

**Аннотация.** Точность измерения расхода воды является ключевым аспектом при разработке высокопроизводительных систем, а также в вопросах надежного обслуживания оборудования и определения целесообразности его применения. Для регулирования расхода воды, проходящей через насос, проектируется замкнутая система управления на базе микроконтроллера. Кроме того, для измерения расхода воды в качестве обратной связи применяется датчик Холла (расходомер). Целью данной работы является исследование погрешности измерения в системе управления с обратной связью. Оптимальное значение коэффициента усиления сигнала оценивается на уровне 0,5. В этом случае в системе фиксируется наименьшая погрешность измерения: 2% в окрестностях рабочей точки ( $44,4 \pm 0,9$ ) мл/мин. При этом наблюдается повторяемость неопределенности измерений, что является наиболее значительным результатом при исследовании системы. Следовательно, указанный коэффициент усиления замкнутой системы управления расходом воды определяет эффективную работу системы в целом и обеспечивает наилучшую точность измерений.

**Ключевые слова:** погрешность измерения; точность; замкнутая система; расход воды; экспериментальные данные.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Замкнутая система управления обеспечивает автоматическое регулирование управляемой переменной. Сигнал ошибки регулярно обновляется, и разомкнутая система управления требовала бы в этих условиях ручной коррекции [1, 2]. Использование замкнутой системы управления позволяет повысить точность, что особенно важно применительно к задаче измерения расхода воды. Погрешность измерения расхода воды определяется точностью инструментального измерения [3]. Компании, производящие напитки и чистую воду, обычно используют расходомеры, построенные на принципе оценки скорости потока жидкости. Тот же принцип лежит в основе датчиков дождя [4]. Поддержание допустимого значения погрешности измерения расхода воды, не только обеспечивает выполнение технических требований, но и

влияет на качество производимого продукта или выполняемой технологии. Замкнутая система управления также называется системой управления с обратной связью, и датчик-расходомер [5] рассматривается в качестве элемента обратной связи при разработке системы автоматического управления. Для создания же потока в подобных системах в качестве исполнительного механизма используется насос [6, 7, 8].

Целью данной работы является исследование неопределенностей измерений, возникающих в замкнутой системе управления расходом воды.

## II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Структура модели системы управления позволяет легко анализировать поведение объекта. Замкнутая система управления с линейной обратной связью содержит датчики, алгоритмы управления и исполнительные механизмы, задача которых минимизировать погрешность до нуля, а затем принять некоторые переменные в качестве желаемых значений [1].

На рис. 1 представлена структура замкнутой системой управления. Ошибка является разностью между желаемым и измеряемым значениями переменной. Регулятор формирует управляющий сигнал на основе вычисленного значения ошибки. Исполнительный механизм осуществляет управление объектом, посредством реакции на сигнал регулятора. Ошибка системы корректируется в соответствии с измеренным датчиком значением.



Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы управления

Объемный расход воды является одной из единиц СИ, которая представляет собой объем потока воды, проходящий через поверхность в единицу времени [9,10]. Выражение, описывающее эту закономерность представлено формулой:

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

где:  $Q_v$  – объемная скорость потока, мл/мин;  $\Delta V$  – объем жидкости, проходящей через поверхность, мл;  $\Delta t$  – изменение времени, минуты (мин).

Датчик-расходомер в качестве элемента обратной связи используется для измерения объемного расхода. Данный тип датчиков основан на реализации приведенной выше математической закономерности. Существует разнообразие способов проектирования расходомеров, построенные на различных физических принципах, а именно [11]: введение положительное смещения, дифференциальное давление, тепловые явления, электромагнитные явления, ультразвуковое воздействие, эффект Холла и т.д.

Кроме того, для контроля расхода жидкости обычно используют и исполнительный механизм, т.е. насос [7].

### III. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Замкнутая система управления имеет микроконтроллерную реализацию и формирует сигнал усиления для диафрагменного насоса, что позволяет регулировать расход воды. Расходомер, имеющий в основе эффект Холла [3], применяется в качестве элементов обратной связи для измерения расхода воды. Цифровой импульс, сформированный на выходе расходомера, поступает на цифровой ввод микроконтроллера как пропорциональный сигнал измерения объема. Объем 3 мл равен 1 цифровому импульсу расходомера.

Для точного подсчета импульсов расходомера используются прерывания микроконтроллера. Измерение времени ведется по частоте, которая воспроизводится встроенным генератором микроконтроллера. Поэтому в методике измерения реализуется следующая закономерность расчета объемной скорости потока (2):

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \approx \frac{p}{\Delta t} \quad (2)$$

$$Q_v = \frac{p}{\Delta t} + \delta Q \quad (3)$$

где:  $p$  – количество цифровых импульсов расходомера, [1 импульс =  $(3.0 \pm 0.3)$  мл];  $\delta Q$  – повторяемость измерения расхода.

Ошибка между желаемой и измеренной переменными (скорость потока) рассчитывается автоматически и непрерывно, что является преимуществом замкнутой системы управления по сравнению с разомкнутой. Управляющие сигналы формируются в микроконтроллере с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на основе сигнала ошибки.

Коэффициент усиления управляющего сигнала пропорционален величине ошибки. Из-за ограничения тока и напряжения микроконтроллера для привода диафрагменного насоса используется драйвер L298. Уточненная структурная схема замкнутой системы управления расходом воды, построенная на основе рис. 1, представлена на рис. 2.

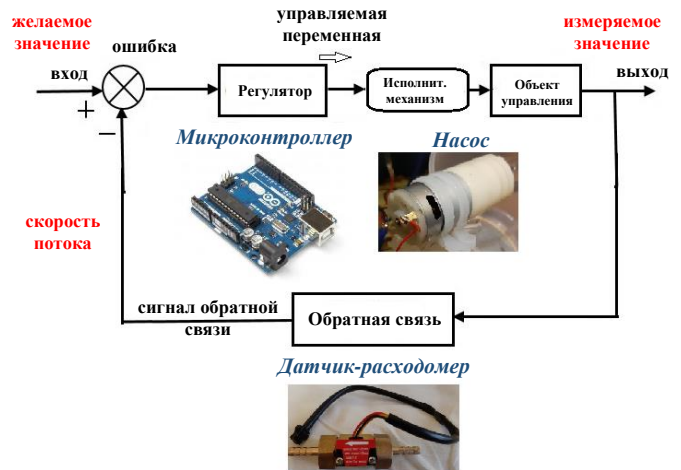


Рис. 2. Реализация замкнутой системы управления расходом воды

Математическая модель расхода по уравнению (3) будет использоваться для оценки неопределенности измерений, и, в частности, повторяемости [12].

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$u_i = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$c_i = \frac{\partial Q}{\partial \bar{x}} \quad (7)$$

$$u_c = \sqrt{\sum c_i^2 \cdot u_i^2} \quad (8)$$

$$U_{ex} = k \cdot u_c \quad (9)$$

где:  $u_i$  – данные неопределенности (погрешности) измерения  $i$ -го повторения;  $u_c$  – совокупная неопределенность;  $c_i$  – коэффициент чувствительности;  $s$  – стандартное отклонение;  $x_i$  – данные  $i$ -го измерения;  $n$  – количество измерений;  $k$  – коэффициент покрытия;  $U_{ex}$  – расширенная неопределенность.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Диафрагменный насос обеспечивает скорость потока воды до 1300 мл/мин, но для проектируемой системы желаемая скорость потока составляет 45 мл/мин. Измерение расхода воды в замкнутой системе управления, в соответствии со схемой на рис. 2, реализовано в виде испытательного стенда, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Испытательный стенд для измерения скорости потока воды [13]

План эксперимента: пропорционального коэффициента усиления изменялся в широком диапазоне (0,1 ~ 1) и использовался для управления расходом жидкости через насос. Измерения проводились 59 раз. Результаты измерений представлены на рис. 4.

График, представленный на рис. 4, описывает сравнение коэффициента флуктуации реакции системы на единичное ступенчатое воздействие для различных коэффициентов усиления (k). Погрешность измерения расхода воды рассчитывается согласно уравнениям (3) – (9) и равны, как показано на рис. 5, соответственно:  $k=0.1 \Rightarrow 44,5 \pm 1,0$  мл/мин;  $k=0.5 \Rightarrow 44,4 \pm 0,9$  мл/мин;  $k=1.0 \Rightarrow 45,9 \pm 1,5$  мл/мин).

Несмотря на то, что результаты экспериментов при указанных значениях k приблизительно равны желаемому значению (45 мл/мин), погрешности измерения отличаются друг от друга.

На рис. 5 показано, что при коэффициенте усиления  $k=0,5$ , значение погрешности измерения имеет наименьшее значение. В таблице приведены результаты расчета бюджета погрешности (неопределенности) и их анализа. Очевидно, что чем больше отклонение реакции на ступенчатое воздействие, тем большее значение погрешности регистрируется в системе.

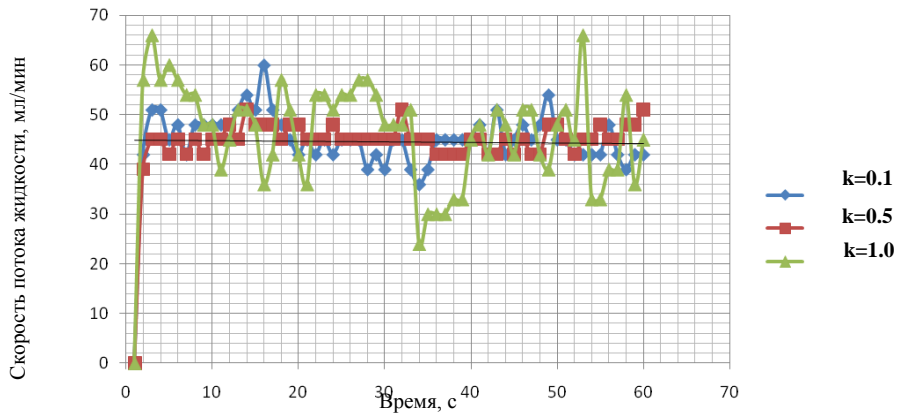


Рис. 4. Результаты измерения расхода воды при вариации коэффициента усиления

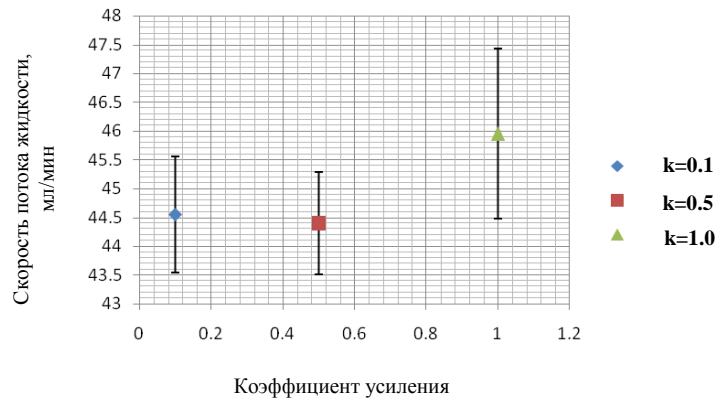


Рис. 5. Исследование погрешности измерений

ТАБЛИЦА I БЮДЖЕТ ПОГРЕШНОСТИ (НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ) ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Компоненты погрешности	$c_i \cdot u(x_i) / x_i$	$(c_i \cdot u(x_i) / u_c)^2$ (%)
Количество преобразования, шт импульсов	0.005068	2.8
Разрешение по количеству импульсов, шт	0.009753	10.5
Количество повторяемости импульсов, шт	0.004609	2.3
Разрешение по времени, $\Delta t$	-0.00089	0.0
Повторяемость времени, $\Delta t$	-0.00089	0.0
Повторяемость расхода, $\delta Q$	0.009219	84.3
Совокупная неопределенность, $u_c$	0.44	
Расширенная неопределенность ( $k=2$ ), $U_{ex}$	0.89	

Повторяемость при измерении скорости потока жидкости имеет наиболее значительное влияние при оценке неопределенности, что может быть продемонстрировано на примере таблицы (84,3%). Также немаловажную роль играет параметр «разрешение по количеству импульсов» (10,5%). В результате относительная неопределенность (погрешность) составляет 2% от конечного результата ( $44,4 \pm 0,9$ ) мл/мин.

Можно утверждать, что различные коэффициенты усиления, которые используются в замкнутой системе управления расходом воды, приводит к разным характеристикам погрешности измерения. Оптимальный [13] коэффициент усиления должен выбираться с учетом максимальной точности измерений

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была спроектирована и исследована замкнутая система управления расхода воды. Согласно техническим требованиям была достигнута заявленная точность поддержания скорости потока жидкости ( $44,4 \pm 0,9$ ) мл/мин. Значение параметра расширенной неопределенности составило 2%.

Доказано, что наиболее значительным фактором, влияющим на неопределенность, является повторяемость измерений. Чтобы получить наименьшую погрешность измерения, необходимо выбрать оптимальный исполнительный коэффициент усиления в системе управления с обратной связью.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов выражает благодарность руководству Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» и

Индонезийскому институту наук LIPI за поддержку этого исследования. Работа выполнена при поддержке Министерства исследований и высшего образования Республики Индонезия в рамках проекта Riset-Pro Kemenristekdikti.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A. Forrai. "Classical Controller Design - Part I. In: Embedded Control System Design". Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [2] P. Ansay, M. Gevers and V. Wertz, "Closed-loop or open-loop models in identification for control?," 1999 European Control Conference (ECC), Karlsruhe, 1999, pp. 1499-1504. doi: 10.23919/ECC.1999.7099524
- [3] J. A. Prakosa, N.T.E. Darmayanti, B. H. Sirenden, Hafid. "Volume Measurement Of Piston Prover Cylinder By Gravimetric Method For Validation Of Water Flow Rate Traceability At METROLOGY LIPI". XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry". Vol 1 Issue 1, pp 1054-1058. Czech Technical University in Prague, 2015.
- [4] J. A. Prakosa, S. Wijonarko and D. Rustandi, "The performance measurement test on rain gauge of tipping bucket due to controlling of the water flow rate," 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow, 2018, pp. 1136-1140. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317291
- [5] R. Garmabdari, S. Shafie, W. Z. W. Hassan, A. Garmabdari, "Study on the effectiveness of dual complementary Hall-effect sensors in water flow measurement for reducing magnetic disturbance", Flow Measurement and Instrumentation Volume 45, October 2015, Pages 280-287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.07.007>
- [6] J. Kim and S. Kim, "The Flow Rate Characteristics of External Gear Pump for EHPS," 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Bangkok, 2013, pp. 346-349. doi: 10.1109/ISMS.2013.113
- [7] I.S. Cho, J.Y. Jung, "A study on flow control valve characteristics in an oil hydraulic vane pump for power steering systems", Journal of Mechanical Science and Technology 29: 2357, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0529-8>
- [8] G. Wang, K.Kiamehr, L. Song, "Development of a virtual pump water flow meter with a flow rate function of motor power and pump head". Energy and Buildings, Volume 117, 1 April 2016, Pages 63-70, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.003>
- [9] Bureau International des Poids et Mesures. "The International System of Units (SI)". 8th Edition. Paris: Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre, 2006
- [10] Kar-Hooi Cheong, R. Doihara, T. Shimada, Y. Terao. "Development of a gravimetric system using a conical rotating double-wing diverter for low liquid flow rates", Flow Measurement and Instrumentation Volume 56, Pages 1-13, August 2017, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.006>
- [11] A. S. Morris, R. Langari, "Chapter 16 - Flow Measurement; Measurement and Instrumentation (Second Edition) Theory and Application", Pages 493-529, Academic Press, 2016.
- [12] JCGM. "JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement". Paris: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIM, 2008
- [13] J. A. Prakosa, A. D. Stotckaia, "The H-Infinity Robust Control for Optimization on Low Water Flow Application". unpublished.