

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО ШАРИКОВОГО РАСХОДОМЕРА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Садыков Р.Р., Ясовеев В.Х.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Ключевые слова: первичный преобразователь расхода, тахометрический расходомер, шариковый расходомер, шариковый расходомер жидкости, шариковый расходомер электропроводной жидкости, электронно-оптический шариковый расходомер, радиопариковый расходомер; струенаправляющий аппарат.

Аннотация. В данной статье показан этап разработки шариковых расходомеров жидкости нового типа – анализ трёхэлектродного шарикового расходомера электропроводящей жидкости при питании электродов стабилизированным напряжением или стабилизированным током. Показаны подробно детали линейного расчёта для обеих вариантов электросхем и приводится вывод как результат анализа.

ANALYSIS OF POWER SUPPLY METHODS FOR THE ELECTRODES OF A THREE-ELECTRODE ROTATING BALL FLOWMETER FOR ELECTRICALLY CONDUCTIVE LIQUIDS

Sadykov R.R., Yasoveev V.Kh.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Keywords: primary flow transducer, tachometric flow meter, rotating ball flow meter, rotating ball liquid flow meter, electrically conductive fluid rotating ball flow meter, electro-optical rotating ball flow meter, rotating radioball flow meter, jet guiding vane.

Abstract. This article describes the development stage of a new type of ball-type liquid flowmeter. It analyzes a three-electrode ball-type flowmeter for a conductive liquid, with the electrode zone supplied with a stabilized voltage or stabilized current. The linear calculation details for both circuit designs are presented in detail, and a conclusion is provided as a result of the analysis.

Уфимское производственное предприятие ООО «ДИ Роботикс Автоматизация» реализует проект по созданию шариковых преобразователей расхода жидкости нового типа. Задачей проекта является утверждение типа средств измерений в Госстандарте РФ по результатам Государственных испытаний. Остроту актуальности реализуемой задачи подчёркивает политика импортозамещения и развития отечественного производства расходомеров нового типа, освоение их серийного производства [1].

Совместно с Уфимским университетом науки и технологий (УУНиТ), в результате исследования и разработки по созданию шариковых преобразователей расхода жидкости (ШПРЖ), были разработаны три вида новых шариковых расходомеров:

- 1) электронно-оптический расходомер любых жидкостей;
- 2) радио-шариковый расходомер любых жидкостей [2];
- 3) расходомер любой электропроводящей жидкости.

Разработанные ШПРЖ обладают общей конструкцией гидромеханической части. В них используется шарик с нулевой плавучестью в жидкости и винтообразный струенаправляющий аппарат с соосно расположенным кольцевым каналом. Все три новых вида шариковых расходомеров генерируют выходной сигнал в форме частоты следования прямоугольных импульсов, пропорциональной величине расхода [3-7].

В данной работе рассмотрим особенности одного из этапов расчёта и анализа при проектировании электронной схемы шарикового расходомера электропроводящей жидкости, а именно проведём анализ трёхэлектродного шарикового расходомера электропроводящей жидкости при питании электродов стабилизированным напряжением или стабилизированным током.

Для наглядности анализа стоит уточнить, что поток жидкости, закрученный струенаправляющим аппаратом 1, приводит в движение шарик с нулевой плавучестью 2, выполненный из диэлектрического материала, по кольцевому каналу (образованному между внешней поверхностью ступицы 3 и внутренней поверхностью корпуса 4), при этом происходит изменение сопротивлений жидкости между электродами Э2 и Э3 в момент прохождения шарика через область установки электродов, как показано на рисунке 1. Электрод Э1 размещён вне кольцевого канала.

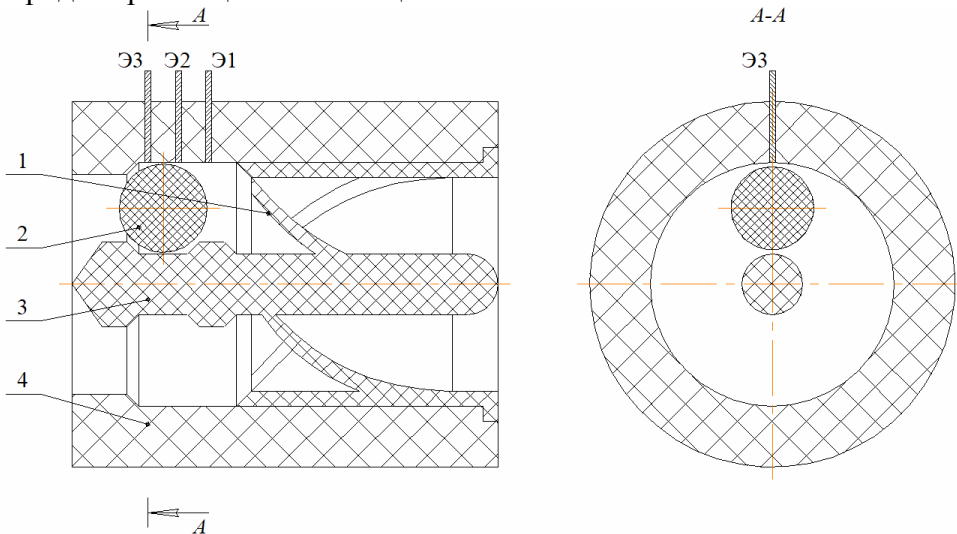


Рис. 1. Гидромеханическая часть шарикового расходомера электропроводной жидкости

1. Электропитание электродов стабилизированным напряжением U_0 .

Напряжение $U_{ж.0}$, когда шарик находится далеко от области расположения электродов Э2-Э3, как показано на рисунке 2:

$$U_{ж.0} = \frac{R_{ж.2}}{R_{ж.1} + R_{ж.2}} U_0,$$

где $R_{ж.1}$ – сопротивление жидкости между электродами Э1 и Э2, $R_{ж.2}$ – сопротивление жидкости между электродами Э2 и Э3, U_0 – стабилизированное напряжение питания.

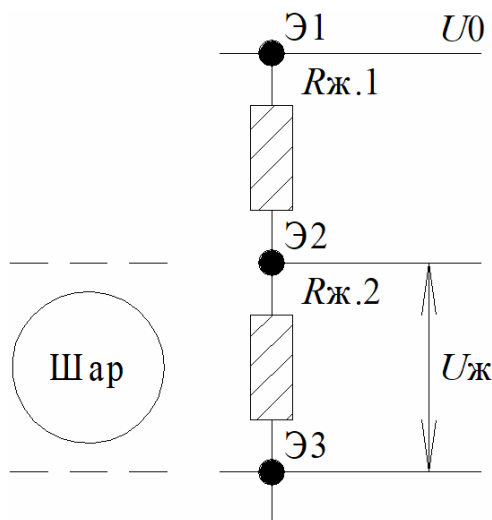


Рис. 2. Схема питания электродов стабилизированным напряжением

Пусть $R_{ж.1} = R_{ж.2} = R_{ж}$, так как электропроводность жидкости, очевидно, одинаковая, тогда

$$U_{ж.0} = \frac{1}{2} U_0 = 0,5 U_0$$

Напряжение $U_{ж.1}$, если шарик оказывается между электродами Э2-Э3, как показано на рисунке 1, то $R_{ж.1} = R_{ж}$, а $R_{ж.2} = R_{ж} + \Delta R_{ж}$:

$$U_{ж.1} = \frac{R_{ж} + \Delta R_{ж}}{R_{ж} + (R_{ж} + \Delta R_{ж})} U_0 = \frac{R_{ж} + \Delta R_{ж}}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}} U_0,$$

где $\Delta R_{ж}$ – величина изменения (увеличения) сопротивление жидкости при прохождении шарика между электродами Э2-Э3 (конструктивно в этот момент происходит вытеснение части объёма электропроводящей жидкости, оставляя электропроводящую жидкость в объёме, обеспечивающимся зазором между шариком и стенкой кольцевого канала (внутренней поверхности корпуса), в котором заподлицо установлены электроды Э2 и Э3, что фактически «увеличивает длину» электропроводящего канала между этими электродами, что ведёт к росту сопротивления на данном участке соответственно).

Изменение напряжения $U_{ж}$ при прохождении шарика между электродами Э2-Э3 найдётся как разность:

$$\begin{aligned} U_{ж} &= U_{ж.0} - U_{ж.1} = \frac{R_{ж} U_0}{R_{ж} + R_{ж}} - \frac{(R_{ж} + \Delta R_{ж}) U_0}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}} = \\ &= \frac{U_0}{2} - \frac{(R_{ж} + \Delta R_{ж}) U_0}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}} = \frac{2R_{ж} + \Delta R_{ж} - 2R_{ж} - 2\Delta R_{ж}}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}} U_0 = \frac{-\Delta R_{ж}}{2(2R_{ж} + \Delta R_{ж})} U_0, \end{aligned}$$

то есть напряжение между электродами Э2-Э3 увеличилось на:

$$\frac{\Delta R_{ж} U_0}{2(2R_{ж} + \Delta R_{ж})}. \quad (1)$$

Коэффициент изменения напряжения $U_{ж}$ будет равен частному от деления (1) на $U_{ж.0} = 0,5 U_0$:

$$K1 = \frac{\Delta R_{ж} U_0}{2(2R_{ж} + \Delta R_{ж})} \cdot \frac{1}{0,5U_0} = \frac{\Delta R_{ж}}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}}. \quad (2)$$

2. Электропитание электродов стабилизированным током I_0 (рис. 3).

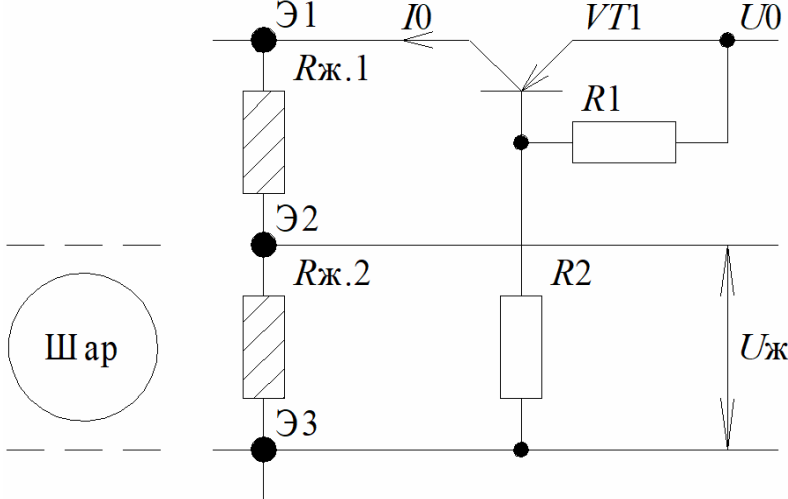


Рис. 3. Схема питания электродов стабилизированным током

Примем режимы работы обеих схем одинаковыми, когда шарик находится на максимальном расстоянии от зоны расположения электродов Э2-Э3, через жидкость протекают одинаковые токи при неизменной электропроводности жидкости, то есть сопротивления жидкости между соответствующими группами электродов равны $R_{ж.1} = R_{ж.2} = R_{ж}$.

Таким образом, для обеих схем имеем равенство $I_0 = U_0/2R_{ж}$, где I_0 – стабилизированный питающий ток.

В начальном состоянии второй схемы $U_{ж.0} = I_0 R_{ж}$.

В тот момент, когда шарик находится между электродами Э2-Э3, а $R_{ж.2} = R_{ж} + \Delta R_{ж}$, тогда $U_{ж.1} = I_0(R_{ж} + \Delta R_{ж})$.

Коэффициент изменения напряжения между электродами Э2-Э3 равен частному от деления:

$$K2 = \frac{I_0(R_{ж} + \Delta R_{ж})}{I_0 R_{ж}} = 1 + \frac{\Delta R_{ж}}{R_{ж}}. \quad (3)$$

Возникает вопрос: какая схема более эффективна для расходомера электропроводной жидкости? Более эффективна та схема, которая имеет больший коэффициент преобразования K .

Необходимо сравнить формулы коэффициентов (2) и (3).

Как было показано выше,

$$K1 = \frac{\Delta R_{ж}}{2R_{ж} + \Delta R_{ж}}, \quad K2 = 1 + \frac{\Delta R_{ж}}{R_{ж}},$$

откуда следует вывод, что $K2$ всегда больше $K1$, так как $0 < K1 < 1$, а $K2 > 1$ при одинаковых режимах работы схем, одинаковых электропроводностях жидкости, конфигурации геометрических размеров кольцевого канала и шарика, что показывает аналитический график на рисунке 4.

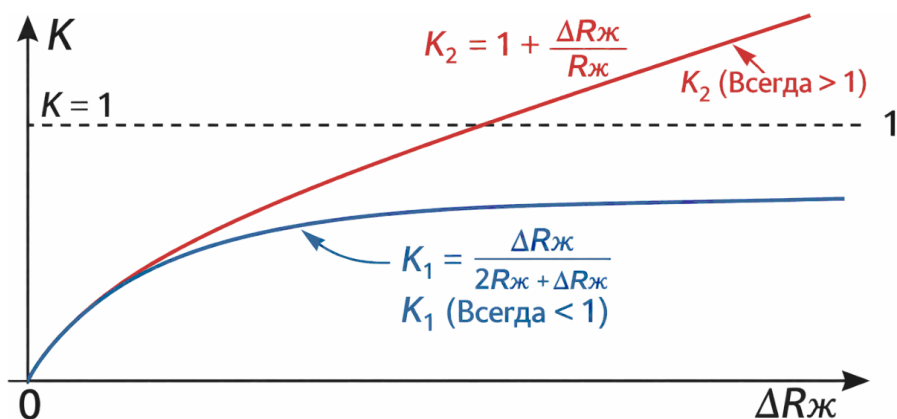


Рис. 4. Графики функций коэффициентов K_1 и K_2

Итак, трёхэлектродная схема с электропитанием электродов стабилизированным током более эффективна в шариковых расходомерах электропроводной жидкости, но требует стабилизатор тока, например, на биполярном транзисторе, включенным по схеме с общим эмиттером.

Список литературы

1. Сафинов Ш.С., Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р. Разработка шарикового расходомера электропроводной жидкости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, №6. – С. 533-541.
2. Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р., Сафинов Ш.С. Актуальность применения шариковых расходомеров в нефтегазовой отрасли // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Молодежный научный форум»: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 25-26 мая 2023г.) / ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 282-287.
3. Садыков Р.Р. Актуальные отечественные разработки шариковых расходомеров жидкости // Мавлютовские чтения: Материалы XVII Всероссийской молодежной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21-23 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 43-48.
4. Сафинов Ш.С., Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р. Разработка современных шариковых расходомеров жидкости в Уфимском университете науки и технологий // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы III Международной научно-технической конференции, Сарапул, 15-16 декабря 2023 года. – Ижевск: УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 148-154.
5. Сафинов Ш.С., Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р. Разработка шарикового расходомера электропроводной жидкости с четырьмя электродами и балансной схемой // Актуальные проблемы науки: взгляд на будущее: Материалы I Всероссийской конференции с международным участием, Сарапул, 30 мая 2024 года. – Ижевск: УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2024. – С. 28-36.
6. Сафинов Ш.С., Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р. Разработка информационно-измерительной системы расхода жидких сред на базе шарикового расходомера электропроводной жидкости с балансной схемой и четырьмя электродами // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 26-28

сентября 2024 года. – Стерлитамак: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 287-295.

7. Ясовеев В.Х., Садыков Р.Р. Разработка и исследование новых отечественных шариковых расходомеров жидкости // Актуальные проблемы науки и техники: взгляд на будущее: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Сарапул, 23 апреля 2025 года. – Ижевск: ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», 2025. – С. 104-109.

References

1. Safinov Sh.S., Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R. Development of a ball flow meter of an electrically conductive fluid // Proceedings of higher educational institutions. Instrumentation. 2024, vol. 67, no 6, pp. 533-541.
2. Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R., Safinov Sh.S. Relevance of the application of ball flowmeters in the oil and gas industry // “Information technologies in science, industry and education. Youth scientific forum”: collection of works of the All-Russian scientific and technical conference (Izhevsk, May 25-26, 2023) / Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. – Izhevsk: UIR IzhSTU named after M.T. Kalashnikov, 2023. – P. 282-287.
3. Sadykov R.R. Current domestic developments of ball liquid flowmeters // Mavlyutov readings: Proceedings of the XVII All-Russian youth scientific conference. In 9 volumes, Ufa, November 21-23, 2023. – Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2024. – P. 43-48.
4. Safinov Sh.S., Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R. Development of modern ball liquid flowmeters at the Ufa University of Science and Technology // Actual problems of science and technology: Proceedings of the III International scientific and technical conference, Sarapul, December 15-16, 2023. – Izhevsk: UIR IzhSTU named after M.T. Kalashnikov, 2023. – P. 148-154.
5. Safinov Sh.S., Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R. Development of a ball flowmeter for conductive liquid with four electrodes and a balanced circuit // Actual problems of science: a look at the future: Proceedings of the I All-Russian conference with international participation, Sarapul, May 30, 2024. – Izhevsk: UIR IzhSTU named after M.T. Kalashnikov, 2024. – P. 28-36.
6. Safinov Sh.S., Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R. Development of an information-measuring system for the flow of liquid media based on a ball flowmeter for electrically conductive liquid with a balanced circuit and four electrodes // Actual problems of science and education in a modern university: Collection of works of the VI International scientific and practical conference, Sterlitamak, September 26-28, 2024. – Sterlitamak: Ufa University of Science and Technology, 2024. – P. 287-295.
7. Yasoveev V.Kh., Sadykov R.R. Development and research of new domestic ball liquid flowmeters // Actual problems of science and technology: a look at the future: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, Sarapul, April 23, 2025. – Izhevsk: FGBOU VO "ISTU named after M.T. Kalashnikov", 2025. – P. 104-109.

Садыков Руслан Рашитович – аспирант	Sadykov Ruslan Rashitovich – postgraduate student
Ясовеев Васих Хаматович – доктор технических наук, профессор	Yasoveev Vasikh Khamatovich – doctor of technical science, professor
srr-91@mail.ru	

Received 16.12.2025