

## РАЗРАБОТКА ШАРИКОВОГО РАСХОДОМЕРА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Р. Р. Садыков\*, Ш. С. Сафинов, В. Х. Ясовеев

*Уфимский университет науки и технологий, Республика Башкортостан, Уфа*  
\* *srr-91@mail.ru*

**Аннотация.** Представлен вариант шарикового расходомера электропроводной жидкости с четырьмя электродами и балансной схемой, обеспечивающей исходное равновесие схемы преобразователя. Представлены результаты опытно-конструкторских работ по созданию шариковых расходомеров электропроводной жидкости, предназначенных для средств автоматизации производственных процессов и социальной сферы экономики, — особенно перспективно использование таких расходомеров в теплоэнергетике, в пищевой и фармацевтической промышленности. Разработанные шариковые расходомеры электропроводной жидкости обладают общим конструктивным признаком. В них используются шарик с нулевой плавучестью в жидкости и винтообразный струенаправляющий аппарат с соосно расположенным кольцевым каналом. Конфигурация струенаправляющего аппарата спроектирована таким образом, чтобы минимизировать потери энергии движущейся жидкости и предотвращать срывы и завихрение жидкости при входе в кольцевой канал. Электронная схема первичного преобразователя расхода генерирует выходной сигнал в форме частоты следования прямоугольных импульсов, пропорциональной величине расхода жидкости.

**Ключевые слова:** *расходомер, первичный преобразователь расхода, шариковый расходомер жидкости, струенаправляющий аппарат, операционный усилитель, компаратор, балансная схема, мостовая схема*

**Ссылка для цитирования:** Садыков Р. Р., Сафинов Ш. С., Ясовеев В. Х. Разработка шарикового расходомера электропроводной жидкости // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 533–541. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-533-541.

## DEVELOPMENT OF A BALL FLOW METER FOR ELECTRICALLY CONDUCTIVE LIQUID

R. R. Sadykov\*, S. S. Safinov, V. K. Yasoveev

*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Republic of Bashkortostan*  
\* *srr-91@mail.ru*

**Abstract.** A variant of a ball flowmeter of an electrically conductive liquid with four electrodes and a balanced circuit is presented, which ensures the initial balance of the converter circuit. Results of development work on the creation of ball flowmeters of electrically conductive liquid intended for automation of production processes and the social sphere of the economy are presented - the use of such flowmeters in heat power engineering, the food and pharmaceutical industries is especially promising. The developed ball flowmeters of electrically conductive liquid have a common design feature. They use a ball with zero buoyancy in a liquid and a helical jet guide apparatus with a coaxially located annular channel. The configuration of the jet guide apparatus is designed in such a way as to minimize energy losses of the moving fluid and prevent breakdowns and turbulence of the fluid at the entrance to the annular channel. The electronic circuit of the primary flow transducer generates an output signal in the form of a rectangular pulse repetition rate proportional to the liquid flow rate.

**Keywords:** *flow meter, primary flow converter, ball flow meter, jet guide vane, operational amplifier, comparator, balanced circuit, bridge circuit*

**For citation:** Sadykov R. R., Safinov S. S., Yasoveev V. K. Development of a ball flowmeter for electrically conductive liquid. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 533–541 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-533-541.

В условиях увеличения численности населения Земли и истощения водных ресурсов при глобальном потеплении и тотальном загрязнении окружающей среды бытовыми и промышленными отходами остро встает задача учета потребления воды как в социальной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве, так и в промышленности и электро- и теплоэнергетике\*.

\* Федеральный закон № 28-ФЗ от 03 апреля 1996 г. „Об энергосбережении“ (с изменениями от 5 апреля 2003 г., 18 декабря 2006 г.); Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ „Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации“, ст. 5, п. 2.

Для учета потребления воды и водяного носителя тепла в системах теплоснабжения могут использоваться расходомеры различного типа, например, турбинные, электромагнитные, вихревые и ультразвуковые\*.

Однако известен еще один тип расходомера жидкости — шариковый [1], который не нашел своего места на рынке ни в социально-бытовой, ни в промышленной сферах экономики, исключая их ограниченное использование в тепло- и электроэнергетике [2]. В Уфимском университете науки и технологий возник вопрос: может ли шариковый расходомер расширить сферу применения [3] в промышленности и, оттеснив расходомеры других типов [4], прежде всего, зарубежного производства, что в полной мере соответствует требованиям импортозамещения в экономике России [5]. Анализ рынка дает положительный ответ, но при условии, что шариковые расходомеры по точности измерения расхода жидкости не уступают другим типам расходомеров, а по динамическому диапазону измерения ( $Q_{\max}/Q_{\min}$ , где  $Q$  — расход жидкости) и себестоимости изделий в условиях серийного производства значительно их превосходят [6].

Анализ информации о продукции отечественных и зарубежных производителей расходомеров и счетчиков количества жидкости (АО „Арзамасский приборостроительный завод“, г. Арзамас; ЗАО „Тепловономер“, г. Мытищи; ООО НПО „Наука“, Чебоксары; ЗАО „Взлёт“, Санкт-Петербург; АО „Метран“, Челябинск; ООО „Термотроник“, Санкт-Петербург; ЗАО „Электронные и механические измерительные системы“, Челябинск; ООО „Геолинк“, Москва; АО „ИПФ СибНА“, Тюмень; ООО „Энергетика“, Москва; ПАО „Завод Старорусприбор“, г. Старая Русса; KROHNE Messtechnik GmbH, Германия; Siemens AG, Германия; ABB Automation Products GmbH, Германия; Yokogawa Electric CIS Ltd., Япония; Schlumberger NV, Schlumberger Limited, США и др.) позволил вычислить коэффициент привлекательности для промышленности и социальной области экономики известных типов расходомеров жидкости:

$$K_{\Pi} = \frac{D}{C\Pi},$$

где  $D$  — динамический диапазон измерения ( $D = Q_{\max}/Q_{\min}$ ),  $C$  — отпускная цена изделия (руб.),  $\Pi$  — допустимая приведенная погрешность измерения (%) [6].

На рис. 1 в виде диаграммы представлены обобщенные значения коэффициента привлекательности  $K_{\Pi}$  различных типов расходомеров типоразмера  $D_u \leq 40$  мм [6].

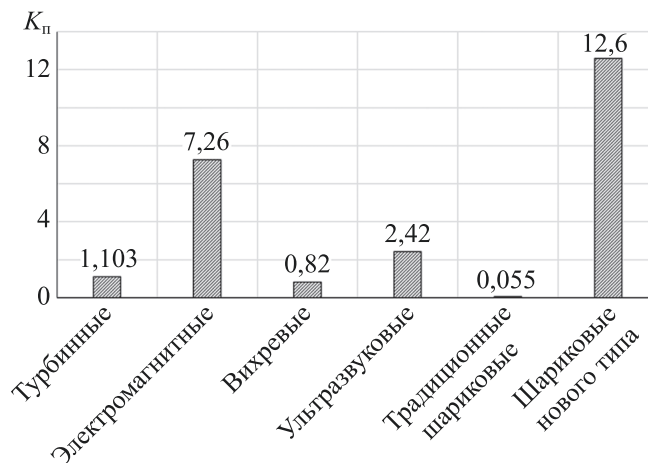


Рис. 1

Результаты анализа параметров и стоимости расходомеров российского и зарубежного производства явились побудительным фактором для разработки шариковых расходомеров. Были

\* ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения.

разработаны три типа шариковых расходомеров жидкости: для электропроводной жидкости, для прозрачной жидкости и для любой жидкости (электропроводной и неэлектропроводной, прозрачной и непрозрачной).

В настоящей статье представлен один из вариантов конструкции шарикового расходомера электропроводной жидкости.

Шариковый расходомер электропроводной жидкости состоит из гидромеханической части и электронного преобразователя частоты вращения шарика, выполненного из диэлектрического материала и имеющего плавучесть в измеряемой жидкости, близкую к нулевой [7], в частоту выходного напряжения.

В Университете на начальном этапе исследований были разработаны и изготовлены шариковые расходомеры жидкости с двумя [7] и тремя [8] электродами электронного преобразователя четырех типоразмеров (Ду-12, Ду-25, Ду-30 и Ду-40), которые положительно зарекомендовали себя при натурных испытаниях в Государственном региональном центре стандартизации, метрологии и испытаний им. А.М. Муратшина (Республика Башкортостан). Эти конструкции, с двумя и тремя электродами, имеют общий недостаток, проявляющийся при больших расходах жидкости и снижающий максимально возможный измеряемый расход жидкости — „опрокидывание“ выходных импульсов и последующее их „слипание“ [9].

Затем был разработан и изготовлен шариковый расходомер типоразмером Ду-50 с четырех-электродной электронной частью (рис. 2), изготовленный при помощи аддитивных технологий (3D-печать по технологии FDM).

Гидромеханическая часть шарикового расходомера электропроводной жидкости (рис. 3) включает в себя цилиндрический корпус 1, изготовленный из диэлектрического материала, такого как стекло, пластмасса или композитный материал. Внутри корпуса расположен струенаправляющий аппарат 2 со ступицей 3 [10]. Выполненный из диэлектрика шарик 4 обладает нулевой плавучестью в жидкости и свободно вращается в кольцевом канале, образованном внутренней поверхностью кольцевого канала корпуса 1 и внешней поверхностью ступицы 3. Кроме того, внутри корпуса 1 симметрично относительно траектории движения шара 4 размещены четыре электрода: Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и Э<sub>4</sub>.

Стационарный относительно корпуса 1 струенаправляющий аппарат 2 состоит из нескольких лопастей, спроектированных таким образом [11], чтобы преобразование входного линейного потока жидкости во вращающийся поток [12] происходило без потери скорости и образования завихрений [13].

Расстояние между электродами Э<sub>1</sub> и Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и Э<sub>4</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub> одинаково, они размещены на корпусе 1 таким образом, чтобы траектория движения шара 4 делила расстояния между электродами Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub> на две равные части.

На рис. 3 показано, что шар 4 вращается по часовой стрелке относительно входа расходомера. Сначала он проходит между электродами Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>, а затем — между электродами Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub>.



Рис. 2

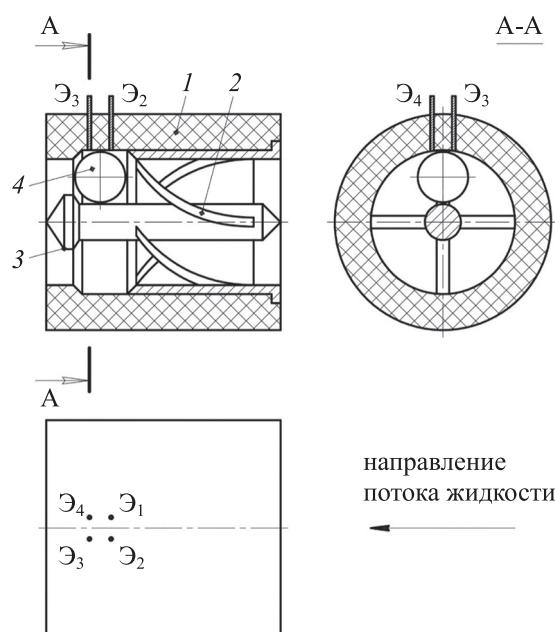


Рис. 3

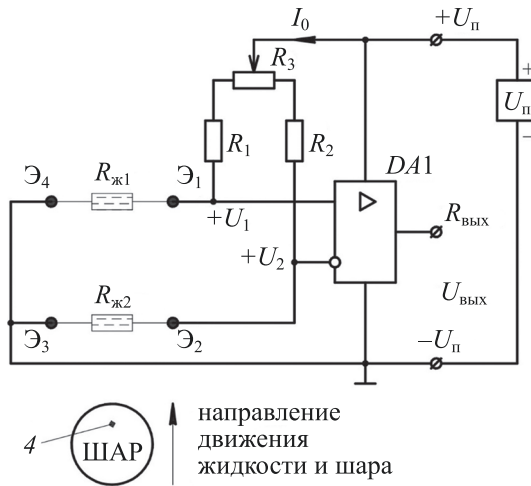


Рис. 4

Электрическая часть шарикового расходомера жидкости, изображенная на рис. 4, состоит из четырех электродов Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и Э<sub>4</sub>, трех резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , источника стабильного питающего напряжения  $U_{\text{п}}$ , а также интегрального операционного усилителя (ОУ)  $DA1$ , работающего в качестве однопорогового компаратора.

В балансной схеме между электродами Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>4</sub> с резисторами  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  включены сопротивления электропроводной жидкости  $R_{\text{ж1}}$  и  $R_{\text{ж2}}$ . Мостовая схема питается стабилизированным напряжением  $U_{\text{п}}$ . Выходное дифференциальное напряжение этого резистивного моста подключается к неинвертирующему и инвертирующему входам ОУ  $DA1$ , который предназначен для нормирования выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  шарикового расходомера [14].

ОУ  $DA1$  работает с однополярным источником питания  $U_{\text{п}}$ . Если входное дифференциальное напряжение  $U_{\text{вх.д}} = U_1 - U_2$  больше  $U_{\text{п}}/k_y$ , где  $k_y$  — коэффициент усиления по напряжению для данного типа интегрального операционного усилителя, то выходное напряжение преобразователя расходомера  $U_{\text{вых}}$  будет максимальным, т. е.  $U_{\text{вых.мах}}$ . У интегральных операционных усилителей значение  $k_y$  обычно составляет десятки или сотни тысяч. Это означает, что сигнал, измеряемый между электродами Э<sub>1</sub> и Э<sub>2</sub>, может иметь очень низкий уровень напряжения, на уровне милливольт. Максимально возможное выходное напряжение интегрального операционного усилителя положительной полярности примерно равно  $U_{\text{вых.мах}} = U_{\text{п}} - 0,6$  В. Если входное напряжение ОУ  $DA1$   $U_{\text{вх.д}} = U_1 - U_2$  меньше нуля (отрицательное), то выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  при однополярном электропитании будет меньше 0,6 В, что является низким уровнем выходного сигнала.

Подстроечный резистор  $R_3$  используется для калибровки схемы в исходное состояние, когда шарик 4 находится неподвижно в области кольцевого канала, противоположной электродам. Это учитывает реальные расхождения в сопротивлениях промышленно производимых резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , а также смещение нуля выходного напряжения операционного усилителя (при  $U_1 = U_2$   $U_{\text{вых}} \neq 0$ ).

С помощью подстроечного резистора  $R_3$  можно компенсировать эти расхождения и достичь состояния, при котором выходное напряжение операционного усилителя будет равно нулю при одинаковых значениях напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Это позволяет установить исходное состояние системы, учитывая неравенство сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  и сдвиг нуля выходного напряжения операционного усилителя.

Для определения сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  учитываются желаемый ток  $I_0$ , равные напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , а также известные сопротивления  $R_{\text{ж1}}$  и  $R_{\text{ж2}}$ , которые представляют собой сопротивления жидкости между электродами Э<sub>1</sub> или Э<sub>2</sub> и общей шиной схемы  $U_{\text{п}}$ , когда система находится в исходном состоянии.

После сборки шарикового расходомера жидкости и перед его предпродажной проверкой и опломбированием требуется настроить электронную схему на нужный режим работы. Для этого используется подстроечный резистор  $R_3$ , который позволяет создать небольшой дисбаланс в мостовой схеме, достаточный для получения требуемого выходного напряжения от ОУ  $DA1$ . Например, если в соответствии с техническими условиями для данного расходомера требуется получить низкое выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  относительно общей шины (не превышающее 0,6 В для интегрального операционного усилителя с однополярным питанием), то с помощью резистора  $R_3$  настраивается небольшое отличие напряжения  $U_2$  на инвертирующем входе ОУ  $DA1$  от напряжения  $U_1$  в несколько милливольт.



В реальных условиях работы шарикового расходомера жидкости, когда поток жидкости отсутствует или его уровень ниже порога чувствительности расходомера, возможно застопоривание шарика 4 между электродами Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>. Это приведет к увеличению сопротивления жидкости между электродами, и напряжение  $U_2$  на инвертирующем входе ОУ DA1 превысит напряжение  $U_1$ . В результате на входе операционного усилителя образуется положительное дифференциальное напряжение, что приведет к формированию постоянного высокого выходного напряжения схемы  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} - 0,6 \text{ В}$ .

Таким образом, в статическом состоянии шарикового расходомера жидкости выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  может принимать высокое или низкое значение, но не будет иметь импульсного характера.

При вращении шарика в кольцевом канале сопротивления жидкости между различными парами электродов — Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>4</sub> — изменяются. Это вызывает модуляцию дифференциального напряжения  $U_1 - U_2$ , а следовательно, появление импульсного выходного напряжения с очень короткими фронтами благодаря высокому коэффициенту усиления интегральных операционных усилителей. Процесс генерации такого импульсного выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , зависящего от значений  $U_1$  и  $U_2$  на неинвертирующем и инвертирующем входах ОУ DA1, и углового положения шара  $\varphi$  относительно электродов Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и Э<sub>4</sub>, показан на рис. 5.

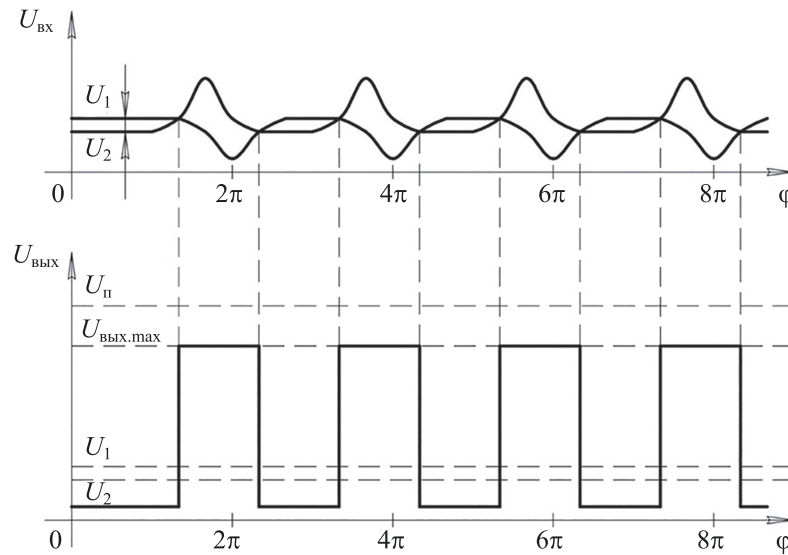


Рис. 5

Рассмотрим, как электронная часть шарикового расходомера в режиме работы, установленном с помощью подстроечного сопротивления  $R_3$ , подавляет влияние уровня электропроводности жидкости в кольцевом канале. На рис. 6 представлены векторы токов положительных и отрицательных ионов жидкости, которые протекают между различными парами электродов: Э<sub>1</sub> и Э<sub>4</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>1</sub> и Э<sub>2</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>3</sub>, Э<sub>2</sub> и Э<sub>4</sub>.

На рис. 6 не указано направление движения положительных и отрицательных ионов, протекающих через жидкость между электродами Э<sub>1</sub> и Э<sub>2</sub>. Это связано с тем, что при прохождении шара под этими электродами направление движения ионов изменяется в зависимости от полярности дифференциального напряжения  $U_1 - U_2$ .

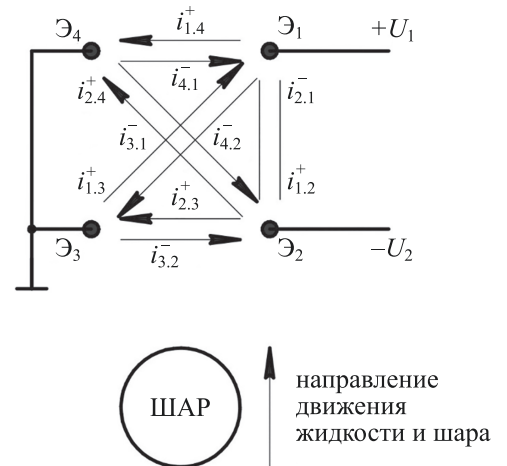


Рис. 6

Если шарик в текущий момент времени располагается между электродами  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_4$ , то дифференциальное напряжение составит

$$U_1 - U_2 = U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}}{R_2 + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}} - U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}}}{R_1 + R_{\text{ж}}},$$

где  $R_{\text{ж}}$  — сопротивление жидкой рабочей среды между электродами, когда шарик находится на отдалении от них, т. е. исключается препятствие движению положительных и отрицательных ионов между этими электродами;  $\Delta R_{\text{ж}}$  — абсолютное увеличение сопротивления жидкой рабочей среды между электродами, когда шарик противодействует свободному передвижению ионов в среде;  $R_1, R_2$  — сопротивление плеч моста без учета малозначительного смещения подвижного контакта потенциометра  $R_3$  относительно его центра, необходимое для фиксации начального состояния схемы.

Для оценки величины и полярности дифференциального напряжения можно считать, что сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , с учетом сопротивлений соответствующих участков переменного сопротивления  $R_3$ , практически равны и их обозначить как  $R$ . Тогда дифференциальное напряжение  $U_1 - U_2$  может быть выражено следующим образом:

$$U_1 - U_2 = \frac{U_{\Pi} R \Delta R_{\text{ж}}}{(R + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}})(R + R_{\text{ж}})} > 0,$$

а на выходе электронной схемы расходомера выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  будет пропорционально дифференциальному напряжению с коэффициентом усиления  $k_y$  по напряжению ОУ DA1. Таким образом, выходное напряжение будет почти равно напряжению питания  $U_{\Pi}$ .

Если шарик в текущий момент времени будет располагаться над электродами  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$ , то дифференциальное напряжение составит

$$U_1 - U_2 = U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}}}{R + R_{\text{ж}}} - U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}}{R + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}} < 0,$$

и напряжение на выходе схемы  $U_{\text{вых}}$  будет предельно низким.

Важно отметить, что дифференциальное напряжение на входе операционного усилителя имеет очень низкий уровень (в милливольтгах), и ток, протекающий между электродами  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  при реальном сопротивлении жидкости, имеет очень малые значения (в микроамперах). При таких низких напряжениях и токах между электродами электрохимические процессы не возникают, и можно пренебречь влиянием движущейся жидкости на подвижность положительных и отрицательных ионов. Жидкость одновременно сдвигает траектории движения положительных и отрицательных ионов в одном и том же направлении, это приводит к одинаковому увеличению длины соответствующих участков электропроводной жидкости и, следовательно, их электрических сопротивлений. В результате синфазные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на электродах  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  увеличиваются, но дифференциальное напряжение на входе ОУ DA1 остается неизменным.

Аналогично можно рассуждать о влиянии величины сопротивления жидкости  $R_{\text{ж}}$  между электродами, зависящего от ее вида, типа и температуры. Изменение этих факторов приводит к равному изменению синфазных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , но их разность  $U_1 - U_2$  остается неизменной, поэтому начальная настройка состояния мостовой схемы не изменится [8].

Динамический диапазон  $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$  измерения расхода жидкости значительно увеличится, если величина дифференциального напряжения  $U_1 - U_2$  при низких расходах будет достаточной для переключения ОУ DA1. Дифференциальное напряжение  $U_1 - U_2$  примет наибольшую величину при оптимальной величине сопротивлений  $R_1 = R_2 = R$ .

Вычислив экстремум функции (1) по параметру  $R$ , получим оптимальное сопротивление

$$R = \sqrt{R_{\text{ж}}^2 + R_{\text{ж}} \Delta R_{\text{ж}}}.$$

Например, пусть  $R_{ж} = 10$  кОм,  $\Delta R_{ж} = 1$  кОм и  $U_{п} = 5$  В. Тогда разность напряжений при  $R = 10,448$  кОм, вычисленном по формуле (2), в соответствии с выражением (1), составит  $U_1 - U_2 = 0,116$  В — этого достаточно для переключения ОУ DA1. Если коэффициент усиления по напряжению ОУ составляет  $50 \cdot 10^3$ , то для его надежного переключения достаточно разности  $U_1 - U_2 = 5/50 \cdot 10^3 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  В, при  $U_{п} = 5$  В.

Наконец, необходимо отметить, что вольт-амперные характеристики воды и других электропроводных жидкостей нелинейны, поэтому при фиксировании режима работы резистивной мостовой схемы следует согласовать напряжение электропитания с тем участком вольт-амперной характеристики жидкости, где наблюдается наибольшая зависимость напряжения от величины протекающего тока. Более того, чувствительность мостовой схемы к положению шарика в кольцевом канале зависит от расстояния между электродами Э<sub>1</sub>, Э<sub>4</sub> и Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и диаметра шарика.

**Заключение.** Таким образом, представленный шариковый расходомер электропроводной жидкости обеспечивает:

— значительное расширение динамического диапазона измерения расхода электропроводной жидкости путем подавления влияния скорости движения жидкости в кольцевом канале на выбранный режим работы электронной схемы. Это позволяет увеличить максимально допустимую величину измеряемого расхода;

— сокращение потребляемой мощности электронной схемой практически в два раза за счет использования одного источника питания (в отличие от схем с двухполярным питанием операционного усилителя);

— возможность применения однопорогового компаратора на операционном усилителе, что способствует упрощению схемы и повышению ее надежности [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кремлёвский П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 1. СПб: Политехника, 2002. С. 331–335.
2. *Загребаев А. М., Попов Е. О.* Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК // Глобальная ядерная безопасность. 2023. № 2(47). С. 24–30. DOI 10.26583/gns-2023-02-03. EDN PJXECW.
3. *Хайруллин Б. Д.* Анализ работы тахометрических расходомеров // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 9-й Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. Курск, 18 ноября 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 232–235. EDN UICYJY.
4. *Абрамов Г. С., Барычев А. В.* Практическая расходометрия в нефтяной промышленности. М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2002.
5. *Реут В. И., Федорова Ю. М.* Новые решения в конструкции шариковых расходомеров // Приборы. 2016. № 7(193). С. 37–40. EDN WMOZLP.
6. *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: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Ижевск, 25–26 мая 2023. Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2023. С. 282–287.
7. Пат. РФ 2471154 С1, МПК G01F 1/05. Шариковый первичный преобразователь расхода электропроводной жидкости / *А. М. Муллагалеев, Ш. С. Сафинов.* Заяв. 2011132821/28 от 04.08.2011, опубл. 27.12.2012. EDN ZGOSTJ.
8. Пат. РФ 2566428 С1, МПК G01F 1/06. Универсальный электрошариковый первичный преобразователь расхода электропроводной жидкости / *Ш. С. Сафинов, Р. Н. Галлямов.* Заяв. 2014131864/28 от 31.07.2014, опубл. 27.10.2015. EDN WBUKIL.
9. Пат. РФ 2762946 С1, МПК G01F 1/05. Шариковый расходомер электропроводной жидкости / *Д. Н. Пуценко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов.* Заяв. 2020142615 от 22.12.2020, опубл. 24.12.2021. EDN MQLXWP.
10. А.с. СССР 1117448 А1, МПК G01F 1/06. Шариковый расходомер / *Ю. Г. Бирик, В. Г. Новиков, М. С. Хабибуллин, Б. Н. Линовский.* Заяв. 3640383 от 31.08.1983, опубл. 07.10.1984. EDN IFTQGC.
11. *Митрофанова О. В.* Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М., 2010. 288 с. EDN MUWSRZ.

12. Пат. РФ 2761416 C1, МПК G01F 1/05. Универсальный шариковый расходомер жидкости / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2021100496 от 12.01.2021, опублик. 08.12.2021. EDN QUUICZ.
13. Пат. РФ 2253843 C1, МПК G01F 1/06. Шариковый преобразователь расхода / С. В. Архангельский, Г. Н. Байкова, Э. Г. Звенигородский и др. Заяв. 2004122571/28 от 26.07.2004, опублик. 10.06.2005. EDN OGXCDQ.
14. Пат. РФ 2779813 C1, МПК G01R 17/16. Мостовой преобразователь сопротивления / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2021126392 от 08.09.2021, опублик. 13.09.2022. EDN CHJUCX.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Руслан Рашитович Садыков** — аспирант; Уфимский университет науки и технологий, кафедра электронной инженерии; E-mail: srg-91@mail.ru
- Шамиль Саидович Сафинов** — канд. техн. наук; Уфимский университет науки и технологий, кафедра технической кибернетики; доцент; E-mail: safinov@mail.ru
- Васих Хаматович Ясовеев** — докт. техн. наук; Уфимский университет науки и технологий, кафедра электронной инженерии; профессор; E-mail: yasov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024; одобрена после рецензирования 16.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

### REFERENCES

- Kremlevsky P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv. Kniga 1* (Flow Meters and Substance Quantity Counters. Book 1), St. Petersburg, 2002, pp. 331–335. (in Russ.)
- Zagrebaev A. M., Popov E. O. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* (Global Nuclear Security), 2023, no. 2(47), pp. 24–30, DOI 10.26583/gns-2023-02-03. (in Russ.)
- Khairullin B. D. *Kachestvo produktsii: kontrol', upravleniye, povysheniye, planirovaniye* (Product Quality: Control, Management, Improvement, Planning), Collection of scientific papers of the 9th International Youth Scientific and Practical Conference, Kursk, November 18, 2022. Kursk, 2022, pp. 232–235. (in Russ.)
- Abramov G. S., Barychev A. V. *Prakticheskaya raskhodometriya v neftyanoy promyshlennosti* (Practical Flow Metering in the Oil Industry), Moscow, 2002. (in Russ.)
- Reut V. I., Fedorova Yu. M. *Devices*, 2016, no. 7(193), pp. 37–40. (in Russ.)
- Yasoveev V. Kh., Sadykov R. R., Safinov Sh. S. *Informatsionnyye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Molodezhnyy nauchnyy forum* (Information technologies in science, industry and education. Youth Scientific Forum), Collection of proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Izhevsk, May 25–26, 2023. Izhevsk, 2023, pp. 282–287. (in Russ.)
- Patent RU 2471154 C1, G01F 1/05, *Sharikovyy pervichnyy preobrazovatel' raskhoda elektroprovodnoy zhidkosti* (Ball Primary Converter for the Flow of Electrically Conductive Liquid), A. M. Mullagaleev, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2011132821/28, Priority 04.08.2011, Published 27.12.2012. (in Russ.)
- Patent RU 2566428 C1, G01F 1/06, *Universal'nyy elektrosharikovyy pervichnyy preobrazovatel' raskhoda elektroprovodnoy zhidkosti* (Universal Electric Ball Primary Flow Converter for Electrically Conductive Liquid), Sh. S. Safinov, R. N. Gallyamov, Patent application no. 2014131864/28, Priority 31.07.2014, Published 27.10.2015. (in Russ.)
- Patent RU 2762946 C1, G01F 1/05, *Sharikovyy raskhodomer elektroprovodnoy zhidkosti* (Ball Flow Meter of Electrically Conductive Liquid), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2020142615, Priority 22.12.2020, Published 24.12.2021. (in Russ.)
- Certificate of authorship USSR1117448 A1, G01F 1/06, *Sharikovyy raskhodomer* (Ball Flow Meter), Yu. G. Bibik, V. G. Novikov, M. S. Khabibulin, B. N. Linovsky, Application no. 3640383, Priority 31.08.1983, Published 07.10.1984. (in Russ.)
- Mitrofanova O. V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok* (Hydrodynamics and Heat Transfer of Swirling Flows in the Channels of Nuclear Power Plants), Moscow, 2010, 288 p. (in Russ.)
- Patent RU 2761416 C1, G01F 1/05, *Universal'nyy sharikovyy raskhodomer zhidkosti* (Universal Ball Liquid Flow Meter), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2021100496, Priority 12.01.2021, Published 08.12.2021. (in Russ.)
- Patent RU 2253843 C1, G01F 1/06, *Sharikovyy preobrazovatel' raskhoda* (Ball Flow Converter), S. V. Arkhangelsky, G. N. Baykova, E. G. Zvenigorodsky etc., Patent application no. 2004122571/28, Priority 26.07.2004, Published 10.06.2005. (in Russ.)
- Patent RU 2779813 C1, G01R 17/16, *Mostovoy preobrazovatel' soprotivleniya* (Bridge Resistance Converter), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2021126392, Priority 08.09.2021, Published 13.09.2022. (in Russ.)



**DATA ON AUTHOR**

- Ruslan R. Sadykov** — Post-Graduate Student; Ufa University of Science and Technology, Department of Electronic Engineering; University; E-mail: srr-91@mail.ru
- Shamil S. Safinov** — PhD, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Department of Technical Cybernetics; E-mail: safinov@mail.ru
- Vasikh K. Yasoveev** — Dr. Sci. Professor; Ufa University of Science and Technology, Department of Electronic Engineering; E-mail: yasov@mail.ru

Received 30.01.2024; approved after reviewing 16.03.2024; accepted for publication 16.04.2024