УДК 621:53.08

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Воробей Р.И.[1], Гусев О.К.[1], Жарин А.Л.[1], Кузьминский Ю.Г.[2], Свистун А.И.[1], Тявловский А.К.[1], Тявловский К.Л.[1], Шилько С.В.[2]

[1] Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
[2] Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Для разработки многофункционального измерительного преобразователя концентрации и типа раствора в технологическом трубопроводе использована методология измерений параметров объектов в неопределенных состояниях. Показано, что режимы измерений концентрации и типа раствора могут быть реализованы в одном одноэлементном кондуктометрическом преобразователе при условии адаптивного управления режимами возбуждения электродной системы. Разработаны алгоритмы многопараметрических измерений и конструкция многофункционального измерительного преобразователя параметров жидких технологических сред, реализующего адаптационную методику измерений параметров объектов в неопределенных состояниях. (E-mail: nil_pt@bntu.by)

Ключевые слова: многопараметрические измерения, одноэлементный преобразователь, кондуктометрия, концентрация раствора, тип раствора.

Введение

Управление рядом технологических процессов предприятий перерабатывающей промышленности связано с определением параметров состава жидких технологических сред в заданных точках технологического маршрута в реальном масштабе времени [1]. К таким параметрам в первую очередь относят концентрацию и тип растворенного вещества в водном растворе. В качестве растворенных веществ могут выступать электролиты (кислоты, щелочи, соли), а также основной продукт производства, проталкиваемый по трубопроводу порцией воды. При этом объект технологического контроля представляет собой последовательность несмешиваемых доз растворов различного типа. Объект движется по длинному разветвленному трубопроводу и в априорно неизвестной очередности омывает электроды чувствительного элемента. В этих случаях измерение концентрации без знания типа раствора может сопровождаться грубыми погрешностями, связанными с различием градуировочной характеристики преобразователя для различных типов электролитов. Величина этой погрешности при ошибочном определении типа раствора может превышать допускаемые значения в два и более раз [2]. Корректное определение типа и концентрации технологического раствора является необходимым условием для организации процесса мойки технологического оборудования, определения возможности сброса нейтрализованных стоков в канализацию, разделения сред при приемке продукта и других технологических операций.

Постановка задачи

Для контроля параметров жидких технологических сред традиционно используются кондуктометрические методы измерения, как наиболее простые в реализации [2].

В качестве входного измерительного сигнала первичного измерительного преобразователя $X(j)$ используется импеданс $z(j)$ между измерительными электродами кондуктометрической ячейки, погруженными в электролит. Кондуктометрические измерения концентрации раствора электролита основаны на использовании функциональной зависимости тока активной проводимости i_R и концентрации C:

$$i_R = k^{-1} U_R \chi(C) = f(C), \quad (1)$$

где i_R – активная составляющая электрического тока через два электрода, образующих электрический контакт с объектом измерений, k – постоянная ячейки, U_R – падение напряжения на активном сопротивлении между электродами, χ – удельная электрическая проводимость (УЭП) раствора.

Задание функции $f(C)$ осуществляется посредством установления градуировочной характеристики, определяемой типом раствора, подлежащего измерениям.

Для определения типа раствора (параметра j) с использованием кондуктометрической ячейки применяется анализ динамических вольт-амперных характеристик (потенциодинамических кривых), реализуемых при подаче на электроды ячейки линейно возрастающего напряжения [3]. Потенциодинамическая кривая в общем случае включает три четко разграниченных участка: I – участок ионизации водорода, характеризующийся быстрым ростом поляризационного тока; II – участок идеальной поляризуемости, в пределах которого основная доля перенесенного заряда идет на заряжение двойного электрического слоя, что приводит к стабилизации уровня тока; III – участок электролиза воды, характеризующийся резким ростом тока (рисунок 1). Определение типа раствора осуществляется путем измерения мгновенного значения тока динамической поляризации при характеристическом напряжении Ux.

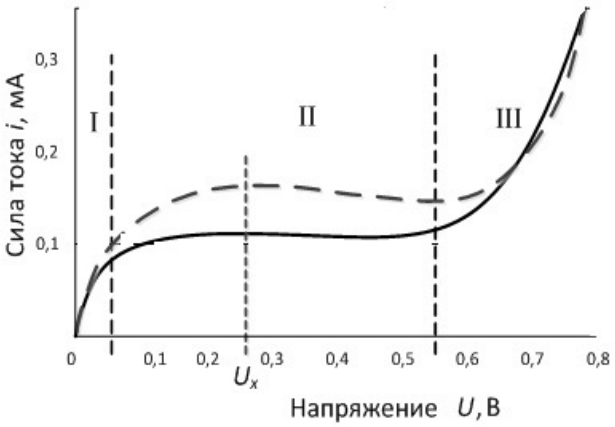

Рисунок 1 – Вид потенциодинамической кривой двух различных растворов при скорости развертки напряжения 0,05 В/с: I – участок ионизации водорода; II – участок идеальной поляризуемости; III – участок электролиза воды

При практической реализации анализа потенциодинамических кривых следует учитывать, что характеристики двойного электрического слоя зависят от предыстории («биографии») электродов датчика, которая определяют состояния их поверхности. Для исключения влияния предыстории измерений в измерительном преобразователе используется запоминание значения поляризационного тока воды [4].

При традиционной реализации контроля параметров жидких технологических сред указанными методами требуется наличие отдельных преобразователей типа и концентрации раствора, устанавливаемых на некотором расстоянии друг от друга с целью исключения взаимного влияния [1, 2, 4]. Помимо усложнения конструкции измерительной системы (необходимость двух раздельных измерительных каналов, двух врезок в технологический трубопровод), это приводит к возникновению дополнительной погрешности, связанной с неоднородностью состава перекачиваемой по трубопроводу среды, вследствие чего концентрация и тип раствора в месте установки измерительных преобразователей могут отличаться. Решение данной проблемы может основываться на использовании универсального измерительного преобразователя, обеспечивающего определение как концентрации, так и типа раствора. Однако до настоящего времени сведения о таких преобразователях в литературе отсутствуют.

Целью данной работы являлась разработка многофункционального измерительного преобразователя параметров жидких технологических сред, обеспечивающего предварительное определение типа раствора и последующее измерение его концентрации.

Многофункциональный измерительный преобразователь

В наиболее распространенных задачах технологического контроля [1, 3] реализуется достаточно простой случай, когда объект измерений может находиться в одном из трех метрологических состояний $X(j)$: когда чувствительный элемент взаимодействует с электролитом первого типа ($j = 1$), второго типа ($j = 2$) и водой ($j = 3$). Измеряемой физической величиной является концентрация электролита $x(j) = C(j)$ в j-м состоянии объекта измерений.

Информативным параметром входного измерительного сигнала $a_0[C^{(j)}]$, содержащим ин

формацию об измеряемой физической величине – концентрации электролита – является активная составляющая импеданса измерительной ячейки R. Информативным параметром входного сигнала $a_S[\Omega^{(j)}]$, содержащим информацию о состоянии объекта измерений $\Omega^{(j)}$, является емкостная составляющая импеданса, обусловленная динамической поляризацией измерительных электродов c_g [3]. Отметим, что емкостная составляющая тока кондуктометрической ячейки при низких (менее порога разложения электролита) напряжениях в классических базовых методах измерений является влияющей величиной, ограничивающей точность измерений концентрации. В результате влияние емкостной составляющей импеданса в традиционных методах измерений концентрации, как правило, минимизируют конструктивными методами.

Выходным измерительным сигналом базового метода кондуктометрических измерений для гармонического измерительного воздействия $U(t)$ является ток кондуктометрической ячейки $i(t)$:

$$Y^{(j)} = i(t) = FF^{(j)}[C^{(j)}] = U(t)z^{-1}. \quad (2)$$

Выходной измерительный сигнал тока $Y^{(j)}$ содержит два информативных параметра. Первый информативный параметр $b_0^{(j)}[X^{(j)}] = i^{(j)}_R$ представляет собой активную составляющую тока, несущую информацию о размере измеряемой физической величины $C^{(j)}$:

$$b_0^{(j)}\left[C^{(j)}\right] = i_R^{(j)} = \Phi FF^{(j)}\left[C^{(j)}\right] = k^{-1}U(t)C^{(j)}\lambda(C^{(j)}). \quad (3)$$

Второй параметр, являющийся неинформативным в базовом методе измерений, представляет собой составляющую тока динамической поляризации в заданный момент времени t^* развертки напряжения и содержит информацию о типе электролита в трубопроводе [5]:

$$b_S\left[\Omega^{(j)}\right] = i_p^{(j)}(t^*) = i_p^{(j)}\left[\varepsilon(t), \frac{dU}{dt}, S(t), t^* d_0^{(j)}(t)\right]. \quad (4)$$

Данный параметр является непосредственно измеряемой величиной и выбран в качестве параметра состояния S:

$$S = b_S\left[\Omega^{(j)}\right] = \Phi FF^{(j)}\left[C^{(j)}\right]. \quad (5)$$

Измеренное значение параметра состояния позволяет определить индекс состояния объекта посредством функционала Φ_Ω:

$$j = \Phi_\Omega(S). \quad (6)$$

В случае нескольких (ограниченного количества) возможных состояний объекта достаточно установить диапазоны пороговых значений $S_j = i_p^{\text{пор}}(t^*)$, нахождение в которых является критерием принадлежности объекта к соответствующему состоянию [6, 7]. Измерение значения концентрации электролита в идентифицированном состоянии осуществляется с использованием обратного преобразования (градуировочной характеристики)

$$C^{(j)} = \left[\Phi FF^{(j)}\right]^{-1}\left[i_R^{(j)}\right]. \quad (7)$$

Таким образом, анализ входного сигнала одноэлементного кондуктометрического преобразователя на основе методологии многопараметрических измерений и односигнальной адаптационной модели взаимодействия электролита априорно неизвестного (из конечного перечня заранее заданных) состава с чувствительными элементами кондуктометрического преобразователя позволяет разделять параметры сигнала, несущие информацию о типе и концентрации раствора. Критерием разделения служит режим возбуждения электродной системы кондуктометрического преобразователя [7, 8]. Для оценки практической применимости полученных результатов было выполнено математическое моделирование контактной кондуктометрической ячейки, работающей в режимах измерения тока проводимости и тока динамической поляризации. Результаты моделирования показали, что оба режима могут быть реализованы при одном и том же значении геометрической постоянной кондуктометрической ячейки, т.е. при одной и той же конструкции электродной системы преобразователя. Экспериментальные исследования макетных образцов измерительных преобразователей, построенных с учетом результатов математического моделирования, подтвердили возможность использования одного одноэлементного измерительного преобразователя для определения как типа, так и концентрации раствора электролита при изменении режима возбуждения электродной системы. Таким обра

зом, создание многофункционального измерительного преобразователя сводится к задаче изменения режимов возбуждения электродов кондуктометрической ячейки и переключению режимов работы входного усилителя в зависимости от метрологического состояния объекта и метрологической задачи.

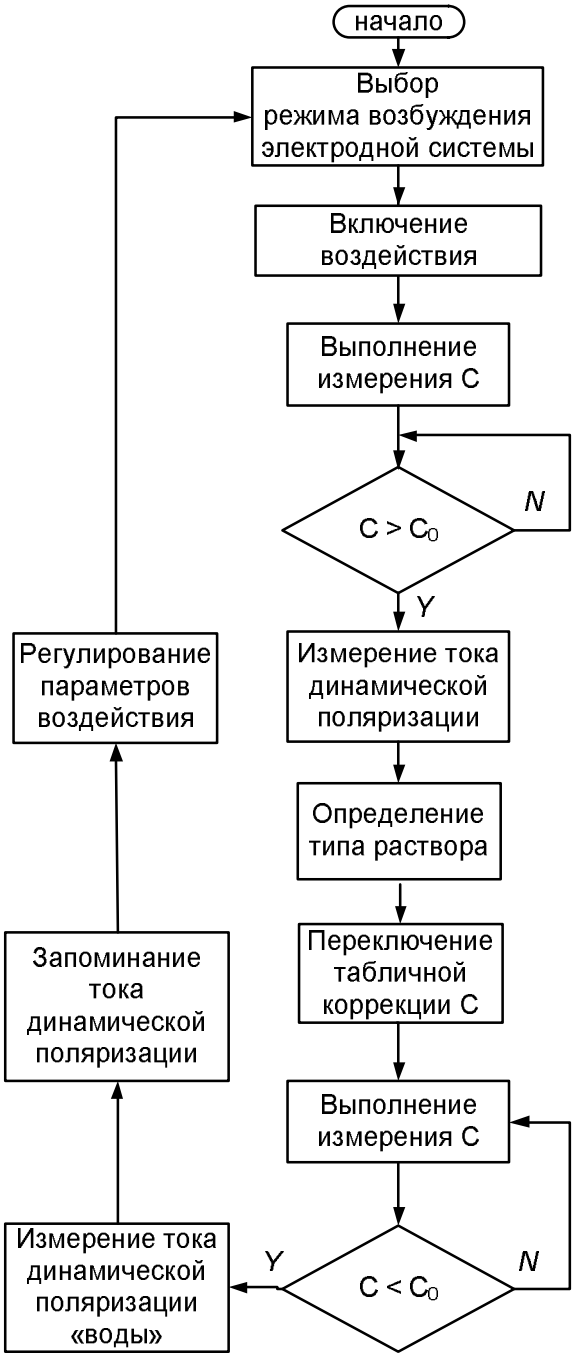

Рисунок 2 – Алгоритм работы одноэлементного многофукционального измерительного преобразователя параметров жидких технологических сред

Алгоритм измерения параметров жидких технологических сред с использованием одноэлементного многопараметрического преобразователя и односигнальной адаптационной модели взаимодействия объекта и средств измерений будет иметь структурную схему, представленную на рисунке 2. Отличительной особенностью алгоритма является осуществление части операций моделирования объекта на этапе измерительного эксперимента с использованием измерительной информации, содержащейся в единственном сигнале базового метода измерений. Следует отметить, что применимость данной методологии ограничена требованием к числу состояний, в которых может находиться объект измерений в процессе решения измерительной задачи [8]. В данном случае число состояний определяется числом типов растворов с различающимися видами характеристик динамической поляризации.

Практическая реализация алгоритма, приведенного на рисунке 2, требует использования микроконтроллера для адаптационного управления режимами работы измерительного преобразователя и анализа многопараметрического измерительного сигнала. Учитывая зависимость величин z в выражении (2) и $\varepsilon(t)$ в выражении (4) от температуры раствора, управляющий контроллер дополнительно осуществляет измерение температуры для внесения необходимых коррекций в результаты измерений.

Схема одноэлементного многопараметрического преобразователя концентрации и типа раствора, реализующего приведенный на рисунке 2 алгоритм, показана на рисунке 3. В качестве управляющего контроллера использован микроконтроллер типа *AVR* (*ATMega* 16) со встроенным модулем аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Генерация напряжения динамической поляризации электродов в начальном режиме определения типа раствора выполняется в контроллере *ATtiny* методом цифрового табличного синтеза формы генерируемого напряжения (*DDS*) [9] при скорости развертки до 0,05 В/с. Работа анализатора типа раствора координируется выходным сигналом информационного канала измерения концентрации в предыдущем цикле измерения. После определения типа раствора на малой концентрации C_0 при изменении типа электролита от состояния «вода» к типу j происходит переключение генератора *DDS* из режима формирования пилообразного напряжения в режим фор

мирования синусоидального напряжения с частотой порядка 8 кГц, что соответствует переходу от режима анализа тока динамической поляризации к анализу тока проводимости. При концентрации раствора в технологическом трубопроводе ниже уровня C_0 (задается программно и не должно быть меньше 0,005 % по условиям разделения параметров сигнала) производится запоминание уровня поляризации «воды». Длительность процесса определения типа раствора не превышает 0,5 с. Для большей надежности повторное определение типа раствора может производиться на протяжении нескольких циклов. Затем работа анализатора типа раствора блокируется до следующего падения концентрации ниже C_0 с тем, чтобы исключить влияние на результаты анализа процессов специфической адсорбции поверхностно-активных ионов из раствора [5], а измерительный преобразователь переходит в режим измерения концентрации (рисунок 4) с подключением функциональной зависимости проводимости от концентрации, реализуемой в виде табличной функции, для определённого типа электролита.

Температурная компенсация осуществляется табличным методом, причем использование адаптационной односигнальной модели взаимодействия объекта и средств измерений позволило повысить точность компенсации по сравнению с базовым методом измерения [4] за счет использования различных таблиц в зависимости от типа раствора и диапазона измерения. Непосредственно регулирование температурной зависимости сигнала проводимости осуществляется изменением глубины обратной связи преобразователя ток – напряжение. В качестве регулирующего элемента используется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), что обеспечивает высокую точность компенсации, ограниченную шумами квантования ЦАП и погрешностью определения функции температурной зависимости (погрешностью составления таблицы коррекции температурной зависимости), хранящейся в запоминающем устройстве (ЗУ) контроллера.

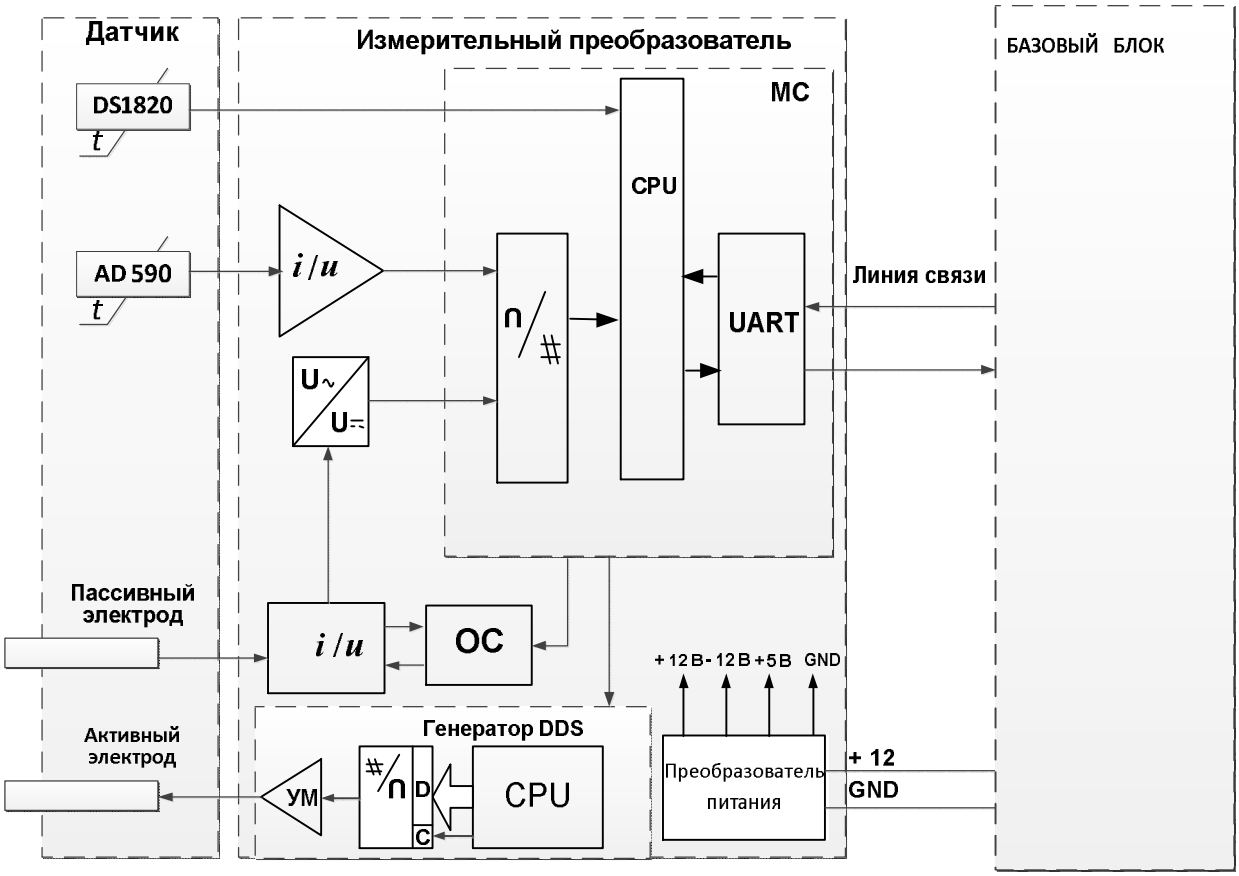

Рисунок 3 – Функциональная схема одноэлементного многопараметрического измерительного преобразователя концентрации и типа раствора

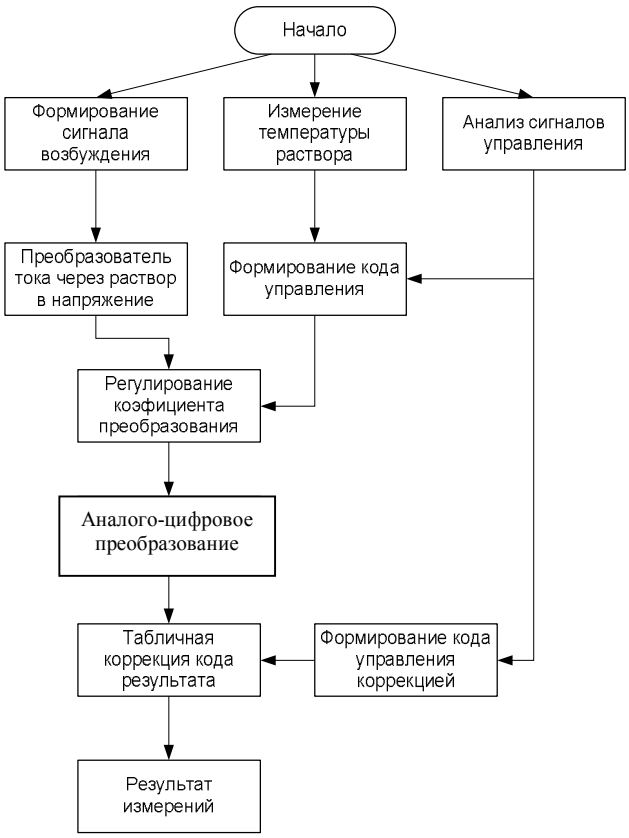

Рисунок 4 – Алгоритм измерения концентрации раствора

Использование цифровых методов в контурах регулирования характеристик способствовало повышению стабильности выходных параметров прибора. Незначительная нелинейность характеристики преобразования датчика автоматически компенсируется цифровым табличным методом. Для компенсации концентрационной зависимости используются различные таблицы коррекции кода результата в зависимости от диапазона измерения и типа раствора. При этом на диапазоне измерения малых значений концентрации учитывается проводимость чистой воды. Выбор необходимых таблиц температурной и концентрационной компенсации осуществляется контроллерами датчика и измерителя концентрации на основе анализа состояния дешифратора сигналов управления и предела измерения.

Измерительный преобразователь обеспечивает возможность подключения к базовому блоку исполнительных устройств, срабатывание которых должно происходить при достижении концентрацией раствора заранее установленных пороговых значений, для каждого типа раствора раздельно.

При необходимости перехода на другую совокупность типов раствора и/или первичного измерительного преобразователя проводимости не требуется изменения электрической схемы прибора. Измерительный преобразователь обеспечивает совместимость с большим числом типов датчиков температуры, гибкую перенастройку и модификацию функциональных характеристик применительно к особенностям конкретного технологического процесса.

Заключение

1. Применение методологии измерений параметров объектов в неопределенных состояниях к измерениям типа и концентрации растворов электролитов в технологических трубопроводах позволило установить возможность разделения параметров сигнала кондуктометрического измерительного преобразователя в схеме односигнальных многопараметрических измерений. Разделение параметров сигнала, определяемых типом раствора и его концентрацией, возможно за счет использования различных режимов возбуждения электродной системы кондуктометрической ячейки, а именно возбуждения линейно изменяющимся напряжением со скоростью развертки порядка 0,05 В/с при определении типа раствора и возбуждения переменным синусоидальным напряжением с частотой порядка 8 кГц при измерениях концентрации.

2. На основе результатов математического моделирования и экспериментальных исследований определено, что обоснованные с помощью использованной методологии режимы измерения токов активной проводимости и динамической поляризации могут быть реализованы в одной конструкции кондуктометрической ячейки, что позволяет создать одноэлементный многофункциональный измерительный преобразователь типа и концентрации раствора, заменяющий два раздельных преобразователя в базовой методике измерений.

3. Реализация односигнальных многопараметрических измерений параметров жидких технологических сред потребовала разработки нового адаптационного алгоритма измерений типа и концентрации раствора, отличительной особенностью которого является осуществление части операций моделирования объекта на этапе измерительного эксперимента с использованием измерительной информации, содер

жащейся в единственном сигнале базового метода измерений.

4. Алгоритм и методика многопараметрических измерений параметров жидких технологических сред реализованы в конструкции измерительного преобразователя, работающего под управлением микроконтроллера семейства AVR. Использование цифрового метода генерации сигналов возбуждения электродной системы чувствительного элемента и программной обработки измерительного сигнала на основе адаптационного алгоритма обеспечивают универсальность разработанного измерительного преобразователя, и возможность его сравнительно простой адаптации для решения других сходных измерительных задач.

Список использованных источников

1. *Брусиловский, Л.П.* Приборы технологического контроля в молочной промышленности : справочник / Л.П. Брусиловский, А.Я. Вайнберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1990. – 288 с.
2. *Грилихес, М.С.* Контактная кондуктометрия: Теория и практика метода / М.С. Грилихес, Б.К. Филановский. – Л. : Химия, 1980. – 176 с.
3. *Гусев, О.К.* Идентификация растворов в технологических трубопроводах на основе явления динамической поляризации / О.К. Гусев // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 60–62.
4. *Гусев, О.К.* Система метрологического обеспечения технических измерений параметров состава электролитов / О. К. Гусев. – Минск : БНТУ, 2004. – 199 с.
5. *Воробей, Р.И.* Определение типа и концентрации растворов электролитов на основе анализа потенциодинамических кривых / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, В.П. Киреенко [и др.] // Вестник БНТУ. – 2003. – № 2. – С. 48–53.
6. *Гусев, О.К.* Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
7. *Гусев, О.К.* Моделирование методов и средств многопараметрических измерений на основе одноэлементных первичных преобразователей / О.К. Гусев, Р.И. Воробей, А.И. Свистун [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 7. – С. 33–37.
8. *Воробей, Р.И.* Алгоритм неразрушающего контроля изделий с прецизионными поверхностями на основе методологии измерения параметров объектов с неопределёнными состояниями / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.В. Дубаневич [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 29–36.
9. *Волович, А.* Генератор сигналов произвольной формы / А. Волович // Схемотехника. – 2001. – № 3. – С. 2–3.

Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L., Kuzminsky Yu.G., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Shilko S.V.

The multifunction measuring converter for monitoring of liquid technological media

The multifunctional sensor of solution type and concentration in a technological pipeline is developed on a basis of the methodology of measurements of parameters of objects with indefinite states. Theoretical and experimental results demonstrate that both concentration measurement and solution type definition modes can be realized in a single one-element sensor. Adaptive control of excitation regimes of sensor's electrodes is needed to ensure single-signal measurements. Algorithms of measurements and construction of a measuring device for multiparameter measurements of liquid media properties utilizing adaptive technique of measurements of parameters of objects with indefinite states are developed. (E-mail: nil_pt@bntu.by)

Key words: multiparameter measurements, one-element sensor, conductance measurements, solution concentration, solution type.

Поступила в редакцию 15.10.2012.