

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РОТАЦИОННЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ ТИПА ВРЦ

О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Для определения вязкости при заданной температуре используются вискозиметры различных типов, чаще всего ротационные. Эти вискозиметры нуждаются в стабилизации частоты вращения измерительного ротора и применении термостатов, так как вязкость сильно зависит от температуры. Предлагается метод измерения вязкости, лишенный этих недостатков. Вискозиметр содержит два канала: канал измерения вязкости и канал измерения температуры. Вращение измерительного ротора осуществляется приводом через калиброванную пружину, угол закручивания которой пропорционален крутящему моменту и преобразуется в широтно-импульсный сигнал. Микроконтроллер производит анализ и измерение ШИМ-сигнала и напряжения, пропорционального температуре, преобразует их в цифровой код, выдает результаты на дисплей и через порт выводит информацию о вязкости и температуре в цифровом виде. Предложенный алгоритм обработки измерительной информации исключает необходимость в стабилизации частоты вращения измерительного ротора.*

***Ключевые слова:** вязкость, ротационный метод измерения, микроконтроллер, повышение точности измерения.*

Технология производства некоторых видов продукции связана с необходимостью измерения динамической вязкости, являющейся или промежуточным, или конечным параметром этой продукции. Во многих случаях значение вязкости определяет и качество продукции.

Большинство вискозиметров, предназначенных для измерения динамической вязкости, отличаются сложностью конструкции, так как нуждаются в стабилизации частоты вращения измерительного ротора, большими затратами времени на температурную подготовку исследуемого образца, для чего применяются термостаты, и невысокой точностью измерения [1]. Кроме того, зарубежные вискозиметры, например фирмы Brukfeld, имеют высокую стоимость [2].

Корганова Ольга Георгиевна (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Кузнецов Владимир Андреевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Предлагается новый алгоритм обработки измерительной информации ротационного метода измерения вязкости, позволивший упростить конструкцию вискозиметра, исключить применение термостата и сократить затраты времени на измерение вязкости при заданной температуре [3].

Известно, что в основе методов измерения динамической вязкости лежит закон Ньютона [4]. Сила, приложенная к измерительному ротору, для ньютоновских жидкостей определяется выражением

$$F = \eta \frac{\omega S}{h}, \quad (1)$$

где η – вязкость исследуемой жидкости;
 ω – угловая скорость вращения ротора;
 S – рабочая площадь ротора;
 h – толщина слоя жидкости.

Из (1) видно, что вязкость может быть определена по силе, приложенной к измерительному ротору, при стабилизации остальных параметров, входящих в это выражение. На практике удобнее измерять не силу, а крутящий момент, приложенный к измерительному ротору:

$$M = F R,$$

где R – радиус измерительного ротора.

С учетом (1) и связи между угловой скоростью и частотой вращения измерительного ротора выражение для крутящего момента примет вид

$$M = \eta \frac{2 \pi n S R^2}{h}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость;
 n – частота вращения измерительного ротора;
 S – площадь рабочей поверхности ротора;
 R – радиус ротора;
 h – толщина слоя жидкости между боковыми поверхностями ротора и измерительного цилиндра.

Выражение (2) положено в основу работы большинства современных вискозиметров. Вязкость определяется по алгоритму [5]

$$\eta = \frac{h}{2 \pi n S R^2} M. \quad (3)$$

Недостаток этого метода измерения связан с тем, что крутящий момент, по которому определяется вязкость, зависит не только от этой вязкости, но и от частоты вращения n измерительного ротора, что приводит к необходимости стабилизации этого параметра и усложнению конструкции прибора.

Разработанная конструкция измерительного преобразователя позволила алгоритмически устранить этот недостаток и создать вискозиметр, инвариантный к частоте вращения измерительного ротора [6].

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного прибора для измерения динамической вязкости.

Вращение измерительного ротора (ИР) осуществляется приводом (ИП) через калиброванную измерительную пружину (ИП). Диски с метками (ДМ) насажены

соответственно на оси привода и измерительного ротора, поэтому при вращении измерительного ротора в исследуемой жидкости (ИЖ) диск на измерительном роторе отстает от диска на приводе вследствие вязкого трения. Угол закручивания измерительной пружины пропорционален крутящему моменту, если пружина работает в пределах линейной зоны деформации [7].

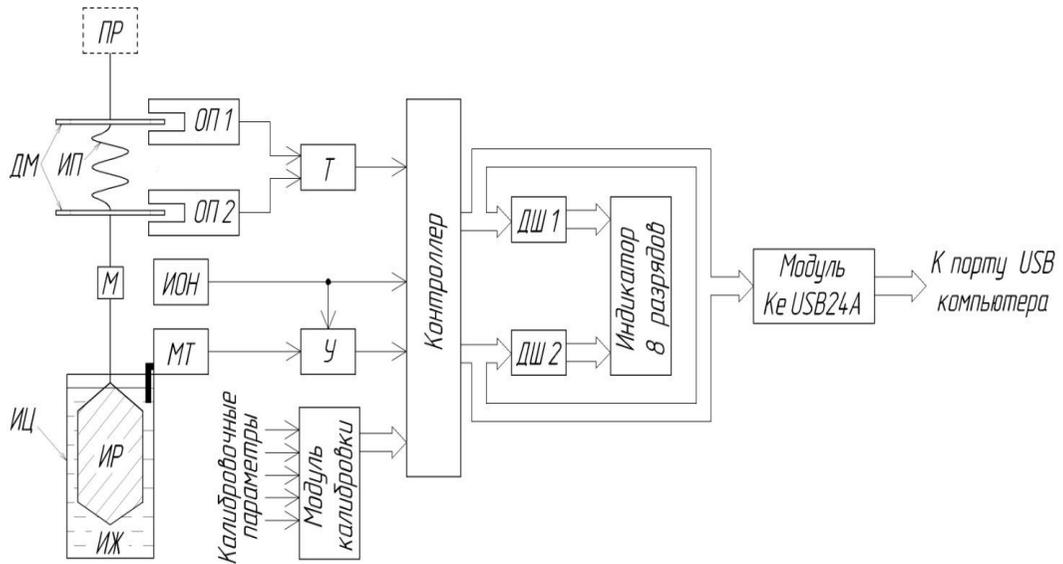


Рис. 1. Структурная схема ротационного вискозиметра

Независимость результата измерения вязкости от частоты вращения измерительного ротора достигается следующим образом [8].

В дисках выполнены радиальные прорезы, через которые проходит свет оптопар. При прохождении каждой прорезы внутри оптопары генерируется электрический импульс, поступающий на вход триггера Т [9].

Угол закручивания измерительной пружины определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{K_{\text{п}}} M, \quad (4)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент жесткости пружины;

M – крутящий момент, определяемый выражением (2).

При закручивании пружины электрические импульсы оптопар сдвигаются относительно друг друга на время τ :

$$\tau = \frac{T}{2\pi} \alpha = \frac{\alpha}{2\pi n}. \quad (5)$$

Здесь: T – период вращения измерительного ротора;
 n – частота вращения измерительного ротора.

Отсюда

$$\tau = \frac{M}{2\pi n K_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Подставляя (2) в (5), получим:

$$\tau = \frac{M}{2\pi n K_{\Pi}} = \frac{\eta 2\pi n S R^2}{h 2\pi n K_{\Pi}} = \frac{n S R^2}{h K_{\Pi}}. \quad (7)$$

Из (7) находится алгоритм определения вязкости:

$$\eta = \frac{h 2\pi n K_{\Pi} \tau}{2\pi n S R^2} = \frac{h K_{\Pi}}{S R^2} \tau. \quad (8)$$

Из этого выражения видно, что вязкость однозначно определяется по интервалу времени τ , а из алгоритма измерения исключено значение частоты вращения измерительного ротора n .

Интервал времени τ формируется триггером Т и поступает на вход микроконтроллера, который с помощью встроенного АЦП преобразует его в цифровой вход.

Разработанный способ измерения вязкости позволил в качестве электропривода использовать малогабаритные двухфазные синхронные электродвигатели переменного тока без стабилизации частоты вращения и одновременно снизить погрешность измерения вязкости.

Для обеспечения высокой точности измерения вязкости необходимо выполнить условие

$$\frac{h K_{\Pi}}{S R^2} = const.$$

Точность измерения вязкости зависит от стабильности геометрических размеров h, S, R и коэффициента жесткости пружины K_{Π} . Особое внимание уделяется стабилизации коэффициента жесткости пружины, которая в процессе изготовления подвергается закалке и термотренировке. Из геометрических параметров наибольшее влияние на точность измерения вязкости оказывает нестабильность радиуса ротора, значение которого входит в функцию преобразования в квадрате.

Микроконтроллер производит анализ и измерение ШИМ-сигнала и напряжения, пропорционального температуре, преобразование их в цифровой код, сдвиг нуля и масштабирование. В итоге на восьмиразрядный семисегментный цифровой индикатор через дешифраторы ДШ1 и ДШ2 выдаются в динамическом режиме результаты измерения температуры и вязкости. Через ДШ1 передается двоично-десятичный код результата, а через ДШ2 – адрес подсвечиваемого разряда. При необходимости результаты измерения можно передать на компьютер через схему сопряжения, выполненную на типовом модуле KeUSB24A, который связывает микроконтроллер с компьютером через линии USB. Для выполнения сервисных операций, таких как сдвиг «нуля» и изменение чувствительности, используется модуль калибровки, связанный с микроконтроллером по пяти линиям ввода данных. Это линии выбора «температура/вязкость», фиксирования «нуля», увеличения и уменьшения коэффициента чувствительности и фиксирования «чувствительности». На рис. 2 приведен алгоритм работы микроконтроллера. При подаче питания или сигнала начального сброса микроконтроллер осуществляет:

1. Запрет прерывания и настройка указателя стека.
2. Настройка таймера для работы на режим переполнения от внутреннего ге-

нератора. В случае переполнения таймера формируется сигнал прерывания, который вызывает программу обработки прерывания.

3. Конфигурация портов.

4. Задание начальных значений переменным. Некоторым переменным значения присваиваются непосредственно, значения начальных сдвигов и коэффициентов чувствительности температуры и вязкости загружаются из энергонезависимой памяти (EEPROM).

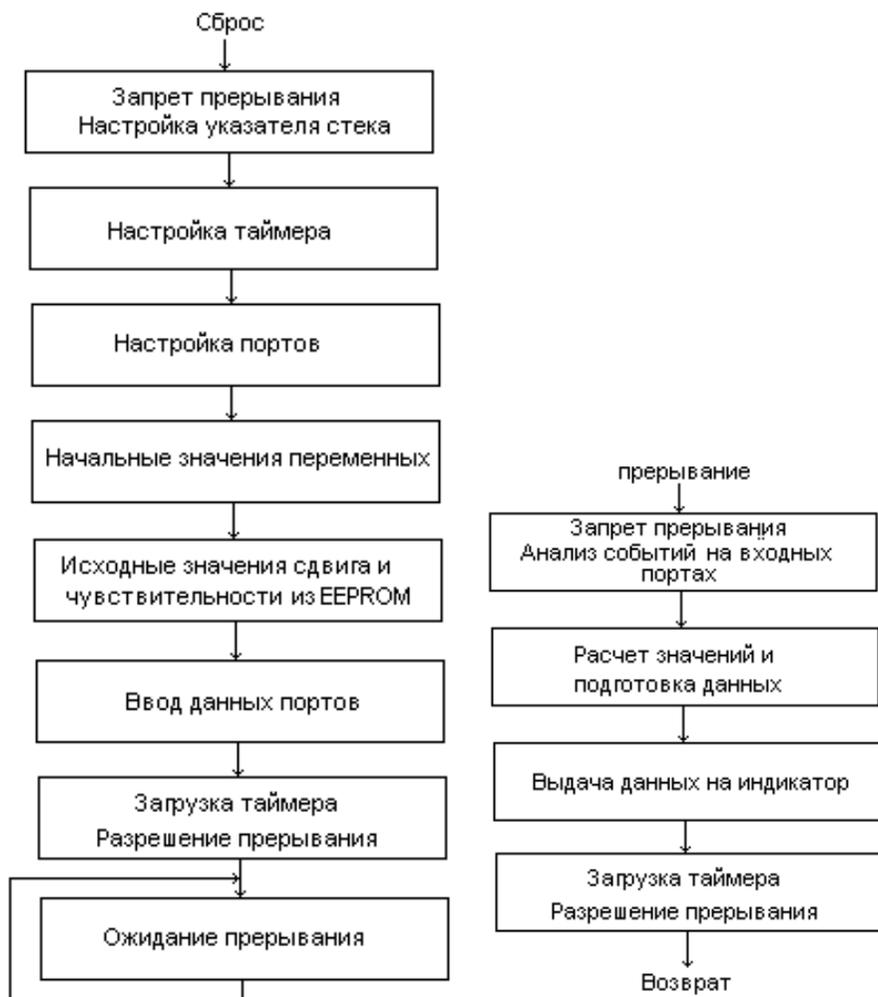


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера

5. Считывание данных состояния портов ввода. Необходимо для анализа событий на входных портах микроконтроллера в программе прерывания.

6. Загрузка начального значения в таймер. Величина начального значения определяет интервал времени, через который таймер переполнится и вызовет программу обработки прерывания.

7. Разрешение прерывания. После этого микроконтроллер не выполняет никаких действий и переходит в состоянии ожидания прерывания.

Программа обработки прерывания производит следующие действия:

1. Анализ событий на входных портах микроконтроллера и соответствующая реакция на каждое событие. В процессе анализа считывается текущее состояние портов и сравнивается с предыдущим, которое считано во время предшествующего прерывания или при начальном запуске программы. Для порта, на который подается ШИМ-сигнал, анализ позволяет выделить передний и задний фронты ШИМ-сигнала. Для портов, обслуживающих модуль калибровки обеспечить команды установки «нуля» и «чувствительности», увеличение/уменьшение чувствительности и идентифицировать канал, по которому производятся действия по калибровке.

2. Расчетные операции выполняются в зависимости от событий на входных портах. Исходные данные для расчета вязкости – это число импульсов прерывания, подсчитанных между разноименными фронтами ШИМ-сигнала. Подсчет числа импульсов между передним и задним фронтами дает информацию о величине, пропорциональной динамической вязкости, между одноименными фронтами – о величине, обратно пропорциональной динамическому сдвигу. После усреднения подсчитанных данных за известное число оборотов измерительного ротора производятся арифметические операции сдвига «нуля», масштабирования и подготовки данных для выдачи на цифровой индикатор. При обнаружении некоторых событий, связанных с модулем калибровки, расчетные операции заканчиваются записью в EEPROM новых значений «нуля» и коэффициента чувствительности. После каждой записи новых калибровочных значений программа принудительно «зависает». Это сделано специально, т. к. время выполнения длительных операций с EEPROM может превысить интервал прерывания. Кроме того, это служит дополнительным напоминанием о том, чтобы после изменения чувствительности не забыли выполнить операцию записи нового коэффициента в EEPROM (операции увеличения и уменьшения коэффициента чувствительности производятся в оперативной памяти). После зависания программы гаснет индикация и необходимо выключить и заново включить прибор, а при начальном сбросе новые значения «нуля» и коэффициента чувствительности извлекаются из EEPROM.

3. Выдача данных из микроконтроллера на индикатор. Таким образом, динамическая индикация выполняется с частотой прерывания микроконтроллера.

4. Восстановление начального значения таймера и переход в режим ожидания прерывания.

Выполнение всех этих действий происходит за время, меньшее времени переполнения таймера, которое задается при его настройке, т. к. длительные операции с EEPROM не используются, поэтому частота прерываний является стабильной и используется как опорная для измерения параметров ШИМ-сигнала. Операция по аналого-цифровому преобразованию напряжения, пропорционального температуре, выполняется при каждом прерывании, однако на индикатор передается сдвинутое и отмасштабированное усредненное значение. Время усреднения температуры меньше времени усреднения вязкости, поэтому значения температуры на индикаторах обновляются чаще, чем значения вязкости.

Вязкость жидкостей сильно зависит от температуры, в связи с чем она измеряется при заданной температуре. Эта температура обычно поддерживается с помощью термостата, что приводит к большим затратам времени на подготовку исследуемого вещества. В вискозиметре ВРЦ используется другой способ.

Вискозиметр автоматически производит измерение вязкости при достижении

исследуемой жидкостью заданной температуры в процессе ее остывания, что позволяет не использовать термостат и сократить время термоподготовки жидкости.

Заданная температура вводится в память микроконтроллера заранее и может быть перестроена пользователем.

Вискозиметр имеет порт вывода информации о вязкости и температуре в цифровом виде для передачи ее в ЭВМ.

В состав прибора входят:

1) измерительный блок, представляющий собой стойку, на которой расположены двигатель с редуктором, измерительная пружина, диски с фотодатчиками, электронный блок;

2) ротор и измерительный стакан с закрепленным на нем малоинерционным термометром;

3) ноутбук, соединенный с измерительным блоком по линиям USB (только для ВРЦ);

4) эталонная жидкость для калибровки.

Для прибора ВРЦ разработана программа (под WinXP), с помощью которой все результаты измерения и калибровки выводятся на экран, снабжаются значениями времени и заносятся в архив.

Основные технические характеристики вискозиметра типа ВРЦ приведены в таблице.

Основные технические характеристики вискозиметра типа ВРЦ

Показатель	Значение
Диапазон измерения вязкости, Па·с (Пуаз)	2...100 (20...1000)
Диапазон измерения температуры, °С	0...100
Основная приведенная погрешность измерения вязкости, %	2,5
Абсолютная погрешность измерения температуры, °С	0,5
Напряжение питания, В(АС)	220
Габариты в рабочем положении, мм	270×200×460
Масса прибора, кг	10

Перспективным направлением развития вискозиметрии является применение микроконтроллера для повышения точности измерения вязкости, в частности для исключения погрешностей, связанных с нестабильностью параметров, входящих в формулу (4). Точность измерения может быть повышена алгоритмическими методами [10, 11, 12].

На рис. 3 представлена структурная схема ротационного вискозиметра повышенной точности [3]. В основу работы вискозиметра положены тестовые методы повышения точности измерения.

Исследуемой жидкостью ИЖ заполняется неподвижный стакан, в который помещается вращающийся измерительный ротор ИР. Измерительный ротор приводится во вращение электродвигателем ЭД через редуктор Р. При вращении ротора в исследуемой жидкости возникает тормозной момент, который пропорционален вязкости жидкости:

$$M_T = K_p n \eta,$$

где K_p – конструктивный коэффициент, зависящий от размеров стакана и ротора;

n – частота вращения ротора;

η – динамическая вязкость.

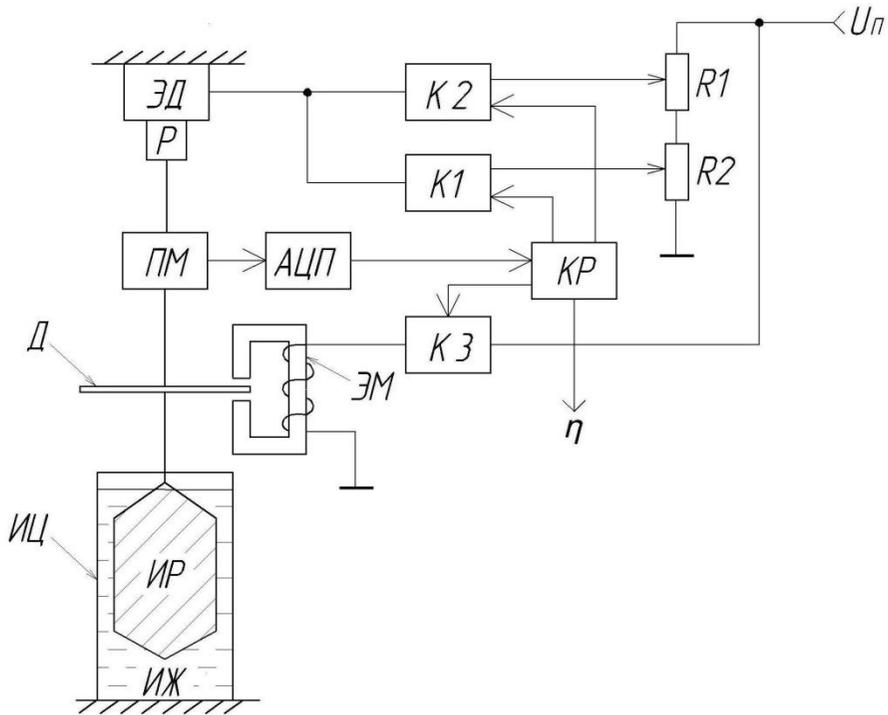


Рис. 3. Структурная схема ротационного вискозиметра повышенной точности

Тормозной момент преобразуется преобразователем (ПМ) в электрический сигнал, а затем посредством АЦП в код, который поступает на вход микроконтроллера КР:

$$N = K_{II} K_p K_{АЦП} n \eta,$$

где N – код, поступающий на вход контроллера;

K_{II} – коэффициент преобразования преобразователя крутящего момента;

$K_{АЦП}$ – коэффициент преобразования АЦП.

Основными источниками погрешности вискозиметра являются нестабильность коэффициентов K_p , K_{II} , $K_{АЦП}$, а также аддитивные погрешности [13, 14].

Для повышения точности измерения вязкости формируются два теста: аддитивный и мультипликативный, а измерения проводятся в три такта. Вычислительные операции и управление вискозиметром выполняются микроконтроллером (КР) [15, 16].

В первом такте ключ К1 открыт, а ключи К2 и К3 закрыты, на электродвигатель подается напряжение, устанавливающее частоту вращения ротора n_1 . На вход контроллера поступает код:

$$N_1 = K_{II} K_p K_{АЦП} n_1 \eta + \Delta \alpha,$$

где $\Delta\alpha$ – аддитивная погрешность.

Во втором такте открывается ключ К3 и электромагнит ЭМ создает дополнительный тормозной момент за счет наведения вихревых токов в диске Д. На вход контроллера поступает код аддитивного теста:

$$N_2 = K_{II} K_P K_{ACII} n_1 (\eta + M) + \Delta\alpha,$$

где M – дополнительный эталонный тормозной момент.

В третьем такте создается мультипликативный тест, при этом ключ К2 открыт, а ключи К1 и К3 закрыты. На электродвигатель подается более высокое напряжение, вследствие чего частота вращения ротора возрастает до n_2 . На вход контроллера поступает код мультипликативного теста:

$$N_3 = K_{II} K_P K_{ACII} n_2 \eta + \Delta\alpha.$$

Результаты трех измерений обрабатываются контроллером по алгоритму:

$$N_2 - N_1 = K_{II} K_P K_{ACII} n_1 M;$$

$$N_3 - N_1 = K_{II} K_P K_{ACII} \eta (n_2 - n_1);$$

$$\frac{N_3 - N_1}{N_2 - N_1} = \frac{\eta (n_2 - n_1)}{n_1 M}.$$

Отсюда определяется вязкость исследуемой жидкости:

$$\eta = \frac{(N_3 - N_1)(n_1 M)}{(N_2 - N_1)(n_2 - n_1)}.$$

Из этого выражения видно, что тестовые методы позволяют полностью исключить из результата измерения аддитивные и мультипликативные погрешности. Точность измерения вязкости определяется погрешностью задания эталонного тормозного момента, погрешностью установки частоты вращения ротора и погрешностью вычислительных операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутоголов В.Д., Кулаков М.В. Ротационные вискозиметры. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. Брукфильд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.brookfieldengineering.com/products>
3. А.с. 1809669 US, МКИ³ G 01 N 11/14. Ротационный вискозиметр / В.А. Кузнецов, А.А. Чикурин.
4. Курс физики: Учеб. в 2 т. / Под ред. В.Н. Лозовского. – 6-е изд., испр. и доп. – М., Спб., Краснодар: Лань. 2009. – 572 с., 600 с.
5. Кузнецов В.А. Физические основы получения информации; учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 216 с.
6. Максудян Л.П., Разикова Н.В. Методология выбора методик испытаний и измерений – инструмент обеспечения безопасности и качества продукции // Контроль качества продукции. – 2018. – № 9. – С. 25–28.
7. Измерения в промышленности / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 462 с.
8. Даренский А.Н., Гончаров И.В., Обласов Н.В. Особенности определения вязкости пластовых нефтей на капиллярном вискозиметре при проведении РVT-тестов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7. – С. 825–833.
9. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.

10. *Бромберг Э.М., Куликовский К.Л.* Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
11. *Кузнецов В.А.* Методы повышения помехоустойчивости и точности средств измерений: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 68 с.
12. *Корганова О.Г., Кузнецов В.А.* Повышение точности вискозиметра методом образцовых мер // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. Вып. 1(9). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 23–27.
13. *Фрайден Дж.* Современные датчики: Справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
14. *Трамперт В.* Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров: Пер. с нем. – К.: МК-Пресс, 2007. – 208 с.
15. *Ратхор Т.С.* Цифровые измерения. АЦП / ЦАП. – М.: Техносфера, 2006. – 392 с.
16. *Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П.* Материалы и элементы электронной техники. Т. 2. – М.: Лань, 2016. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

AUTOMATIC DETERMINATION OF VISCOSITY BY ROTARY VISCOSIMETER VRTS

O.G. Korganova, V.A. Kuznetsov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *If it is necessary to determine the viscosity at a given temperature, various viscometers of various types, mostly rotational ones can be used. These viscometers need to stabilize the frequency of rotation of the measuring rotor and the use of thermostats, since the viscosity is strongly dependent on temperature. A method for measuring viscosity without these disadvantages is proposed. A viscometer contains two channels: a viscosity measuring channel and a temperature measuring channel. Rotation of the measuring rotor is carried out by a drive through a calibrated spring, the angle of its twisting is proportional to the torque, which is converted into a pulse-width signal. The microcontroller measures and analyzes PWM signal and a stress proportional to temperature, converts them into a digital code and outputs the information on viscosity and temperature through the output port in a digital form. The algorithm proposed for processing measurement information eliminates the need to stabilize the frequency of rotation of the measuring rotor.*

Keywords: *viscosity, rotary method of measurement, microcontroller, increase in accuracy of measurement.*

REFERENCES

1. *Krutogolovov V., Kulakov M.* Rotary Viscometers. М.: Publishing House "Mashinostroeniye". – 1984. – 112 p. (in Russian).
2. Brookfield. <https://www.brookfieldengineering.com/products>
3. *Kuznetsov V., Chikurin A.* Rotational viscometer. Author's certificate 1809669 US, MKI³ G 01 N 11/14. (in Russian).
4. Physics course. Textbook in 2 volumes. Edited by V. Losovsky. 6-th edition. М.: Publishing House "Lan", 2009. – 572 p. (in Russian).
5. *Kuznetsov V.* Physical basis of obtaining information. Study guide. Samara, Samara State Technical University. – 2015. – 216 p. (in Russian).
6. *Maksudian L.P., Razikova N.V.* Methodology for selection of test and measurement methods – prod-

*Olga G. Korganova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vladimir A. Kuznetsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

- uct safety and quality tool. Product quality control. № 9, 2018. pp 25–28. (in Russian).
7. Industry measurements. Edited by Profos P. M.: Publishing House "Metallurgy", 1990. – 462 p. (in Russian).
 8. *Darenskii A.N., Goncharov I.V., Oblasov N.V.* Features of determining viscosity of reservoir oils on a capillary viscometer when conducting PVT-tests. International Journal of Applied and Basic Research. № 7, 2016. pp 825–833. (in Russian).
 9. *Topilskiy V.* Measurements circuit engineering. M.: Publishing House "Binom. Laboratory of knowledge", 2006. – 232 p. (in Russian).
 10. *Bromberg E., Kulikovskiy K.* Test methods for improving measurement accuracy. M.: Publishing house "Energy", 1978. – 176 p. (in Russian).
 11. *Kuznetsov V.* Methods to improve noise immunity and accuracy of measuring instruments. Study guide. Samara, Samara State Technical University. – 2011. – 78 p. (in Russian).
 12. *Korganova O., Kuznetsov V.* Improving the accuracy of the viscometer by the method of reference standard. Digest of articles "Information – measuring and control systems". Vol. 1 (9). – Samara, Samara State Technical University. – 2014. – pp 23–27. (in Russian).
 13. *Fryden J.* Modern sensors. Handbook. M.: Publishing House "Technosphere", 2006. – 592 p. (in Russian).
 14. *Trampert V.* Measurement, control and regulation using AVR microcontrollers. Translation from german. M.: Publishing House "MK-Press", 2007. – 208 p. (in Russian).
 15. *Rathor T.* Digital measurements. ADC/DAC. M.: Publishing House "Technosphere". – 2006. – 392 p. (in Russia).
 16. *Sorokin V.S., Antipov B.L., Lazareva N.P.* Materials and elements of electronic equipment. Vol. 2. Publishing Lan, 2016. – 384 p.