

С. В. Абрамов, Н. С. Ульянин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПОГРЕШНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕПОЛНОЙ
КОМПЕНСАЦИИ НЕИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА**

S. V. Abramov, N. S. Ul'yanin

**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ERROR
OF EDDY CURRENT DISPLACEMENT TRANSDUCER TAKING
INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF INCOMPLETE
COMPENSATION OF THE UNINFORMATIVE PARAMETER**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Исследование температурных погрешностей первичных вихретоковых преобразователей (ПВП) является актуальной проблемой при измерении перемещений, особенно для квазидифференциальных схем, в которых помимо оценки температурного влияния на выходной сигнал ПВП необходимо учитывать еще влияние некомпенсации неинформативного параметра. Целью работы является оценка влияния температуры на выходной сигнал ПВП при влиянии неполной компенсации неинформативного параметра схемы замещения. **Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи создана модель ПВП на основе дифференциальных уравнений, связывающих входное напряжение с выходным током. **Результаты.** С помощью предложенной модели определены значения выходного тока ПВП при воздействии температуры и при условии неполной компенсации неинформативного параметра. Рассчитаны относительные погрешности измерения. **Выводы.** Полученные результаты в статье доказывают необходимость выполнения идентичного изготовления измерительной и компенсационной катушек индуктивности.

A b s t r a c t. Background. The study of temperature errors of primary eddy current transducers (PVP) is an urgent problem in the measurement of displacements, especially for quasi-differential schemes, in which in addition to assessing the temperature effect on the output signal of PVP, it is necessary to take into account the influence of the incompensation of the uninformative parameter. The aim of the work is to assess the effect of temperature on the output signal of PVP under the influence of not full compensation of the uninformative parameter of the equivalent circuit. **Materials and methods.** To solve this problem, a model of PVP based on differential equations relating the input voltage to the output current is created. **Results.** With the help of the proposed model, the output current of the measuring circuit is estimated under the influence of temperature and under the condition of incomplete compensation of the uninformative parameter. The relative measurement errors are calculated. **Conclusions.** The results obtained in the article prove the need for identical manufacture of measuring and compensation inductors.

К л ю ч е в ы е с л о в а: схема замещения, ток некомпенсации, первичный вихретоковый преобразователь, информативный сигнал, относительная погрешность.

К e y w o r d s: equivalent circuit, the initial phase, the primary eddy current transducer, data signal, reduced error.

В настоящее время первичные вихретоковые преобразователи (ПВП), обладающие высокими метрологическими характеристиками и надежностью, применяются для бесконтактного измерения и контроля параметров перемещения объектов, работающих в жестких условиях эксплуатации в широком диапазоне температур. Функционирование ракетно-космической техники при криогенных температурах и в условиях термоударов предопределяет выбор именно ПВП при измерении частоты вращения, перемещений, вибраций, осевых и радиальных биений энергетических установок и топливных насосов ракетных двигателей. Достигнутые успехи в развитии микроэлектроники и информатики оказали большое влияние на системы вихретокового контроля и привели к появлению на базе микроконтроллеров интеллектуальных датчиков и автоматизированных систем управления с высокими метрологическими характеристиками.

Достаточно часто при работе ПВП рассматривают температуру как важнейший дестабилизирующий фактор, но помимо этого при использовании квазидифференциальных схем включения на выходной сигнал ПВП оказывает влияние неточность в изготовлении измерительной и компенсационной катушек.

На начальном этапе использования ПВП информативным параметром являлся модуль иммитанса (сопротивления или проводимости) двухполюсной электрической цепи. Модель ПВП представлялась в виде эквивалентной схемы замещения с одним элементом в виде модуля сопротивления Z или проводимости Y двухполюсной цепи. Измерение перемещений с использованием такой модели можно было осуществить относительно простыми измерительными цепями с преобразованием иммитанса в выходной ток или напряжение. На последующих этапах применения ПВП уменьшить указанные погрешности удалось путем представления эквивалентной схемы замещения в виде активной ReW и реактивной ImW – составляющих иммитанса и последующего преобразования информативного параметра двухэлементной схемы замещения. Двухполюсная эквивалентная схема замещения ПВП представлялась в виде соединения активного сопротивления R и индуктивности L . Для отдельного измерения информативных параметров R или L эквивалентной схемы замещения использовались измерительные цепи или вторичные преобразователи с фазочувствительными выпрямителями, что позволяло получить наибольший эффект при больших изменениях соотношений активной ReW и реактивной ImW составляющих иммитанса W [1].

В дальнейшем схема замещения измерительной катушки индуктивности усложнилась и стала представлять собой последовательное соединение начальной индуктивности с активной и реактивной составляющими вносимого электрического сопротивления, зависящего от измеряемого перемещения. Модуль полного вносимого электрического сопротивления зависит от перемещения, частоты питания ПВП и составляет 30–40 % от значения модуля начального полного электрического сопротивления катушки индуктивности.

Для отдельного измерения информативных и неинформативных параметров и, соответственно, снижения температурной погрешности измерения автором предлагается на основе экспериментально снятых амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик измерительной катушки (рис. 1) с применением теории вычетов синтезировать двухэлементную схему замещения ПВП.

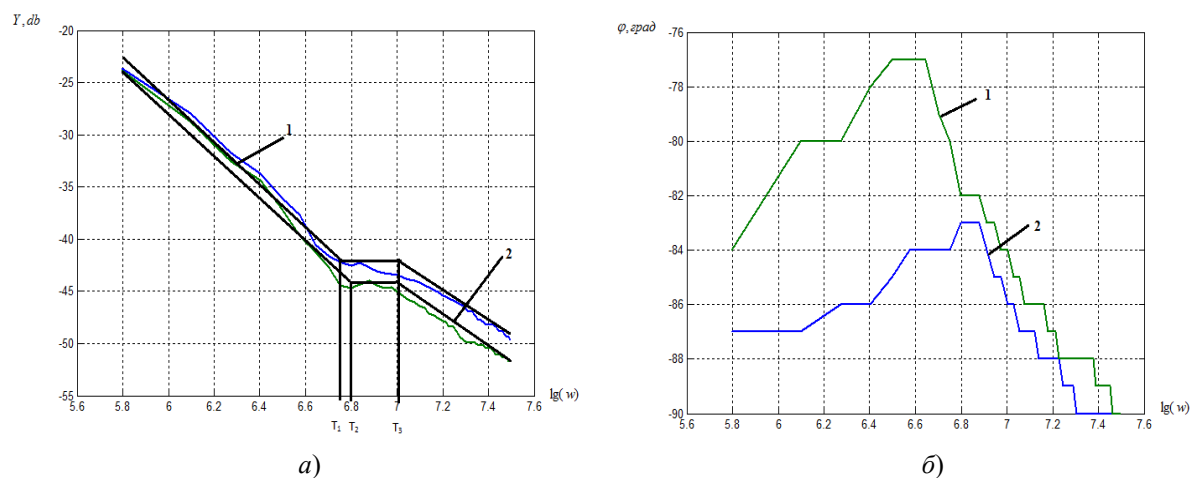


Рис. 1. Экспериментально снятые характеристики измерительной катушки:
 а – аппроксимированные ЛАЧХ измерительной катушки ($1 - h = 0$; $2 - h = \infty$);
 б – ЛФЧХ измерительной катушки ($1 - h = 0$; $2 - h = \infty$)

Исходная и синтезированная схемы замещения ПВП представлены на рис. 2.

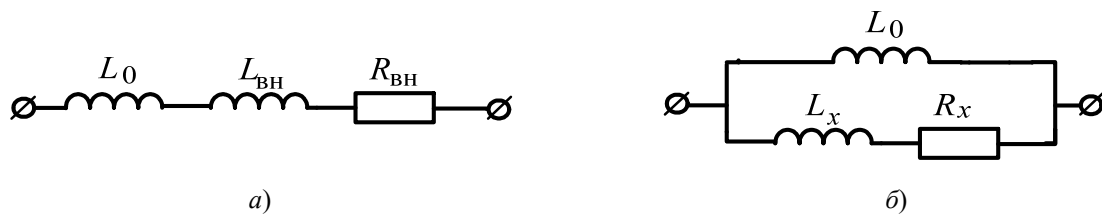


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения ПВП:

a – исходная схема замещения ПВП; *б* – синтезированная схема замещения ПВП

Передаточная функция синтезированной схемы замещения имеет вид

$$Y(p) = \frac{k_o(T_1 p + 1)}{p(T_3 p + 1)} = \frac{\dot{I}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}},$$

где $Y(p)$ – комплексное значение проводимости; k_o – коэффициент усиления; T_1 и T_3 – постоянные времени; $\dot{I}_{\text{вых}}$ – ток на выходе измерительной катушки; $\dot{U}_{\text{вх}}$ – напряжение, приложенное к обмоткам измерительной катушки.

Постоянные времени T_1 и T_3 , коэффициент усиления K_0 для эквивалентной схемы замещения, представленной на рис. 2, *б*, имеют следующий вид:

$$T_1 = \frac{L_0 + L_x}{R_x}; \quad T_3 = \frac{L_x}{R_x}; \quad K_0 = \frac{1}{L_0},$$

где L_0 – начальное значение индуктивности, создающей магнитный поток; L_x – вносимое значение индуктивности, зависящей от перемещения; R_x – вносимое значение активного сопротивления, зависящего от перемещения.

Синтезированная схема замещения состоит из параллельного соединения начальной индуктивности, создающей магнитный поток при номинальном измеряемом перемещении, и последовательного соединения вносимой индуктивности и вносимого сопротивления, зависящих от измеряемого перемещения.

Для устранения начальной индуктивности L_0 автором предлагается ввести дополнительную компенсационную катушку, расположенную соосно от измерительной катушки (рис. 3), и индуктивность которой L_k не изменяется от измеряемого перемещения. Точность компенсации будет зависеть от идентичности изготовления измерительной и компенсационной катушек.

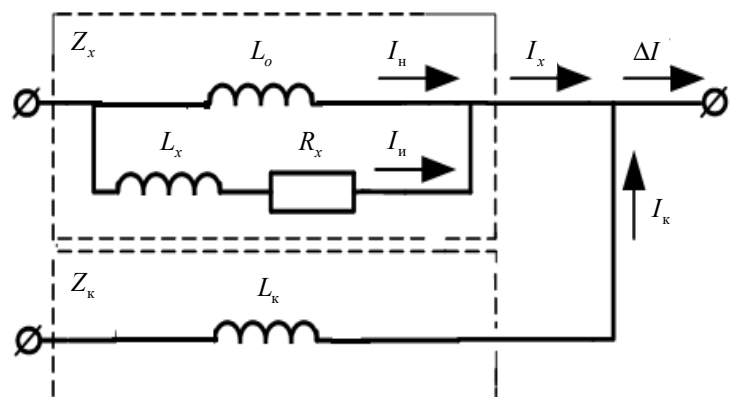


Рис. 3. Дифференциальная схема включения измерительной и компенсационной катушек

В качестве исходных параметров модели в виде трехэлементной схемы замещения было принято: $L_0 = 4$ мкГн; $L_x = 10,9$ мкГн, $R_x = 31,5$ Ом; частота синусоидального напряжения

питания катушки индуктивности ПВП $f = 1$ МГц; амплитуда напряжения питания $U_{\text{пит}} = 5$ В. Параметры L_x и R_x для трехэлементной схемы замещения были определены пересчетом из двухэлементной схемы замещения, имеющей вносимое реактивное сопротивление $L_{\text{вн}} = 1,2$ мкГн (30 % от значения L_0), вносимое активное сопротивление $R_x = 2,5$ Ом (10 % от значения ωL_0) [2]. Начальное значение индуктивности $L_0 = 4$ мкГн было рассчитано для катушки квадратного сечения, у которой количество витков $n = 10$, средний диаметр катушки $d = 1$ см, параметр $\Phi = 12,5$ (зависит от соотношений толщины и диаметра катушки [3]). В качестве выходного параметра контролировался ток на выходе дифференциальной измерительной цепи.

Целью данной статьи является проведение оценки влияния температурного воздействия на ПВП с учетом неполной компенсации неинформативного параметра и подтверждение обязательного требования идентичного изготовления измерительной и компенсационной катушек.

Схеме замещения, представленной на рис. 3, соответствует следующая система дифференциальных уравнений [4, 5]:

$$\begin{cases} L_x \frac{dI}{dt} + R_x I = U_{\text{пит}}, \\ L_{\text{н}} \frac{dI}{dt} = U_{\text{пит}}, \\ L_k \frac{dI}{dt} = -U_{\text{пит}}, \\ I_{\text{н}} + I_{\text{н}} - I_k = \Delta I. \end{cases} \quad (1)$$

Для повышения точности измерений и простоты вычислений значения индуктивностей были увеличены в 10^6 раз, а частота снижена в 10^6 раз.

Модель трехэлементной схемы замещения ПВП приведена на рис. 4, выходной ток ПВП, полученный по результатам моделирования, показан на рис. 5

Влияние температуры характеризуется изменением входных параметров. Для исследования температуры предположим, что параметры $L_{\text{н}}, L_x, R_x, L_k$ увеличены на 10 %. Как и в предыдущем случае, контролировался выходной ток (рис. 6) [6, 7].

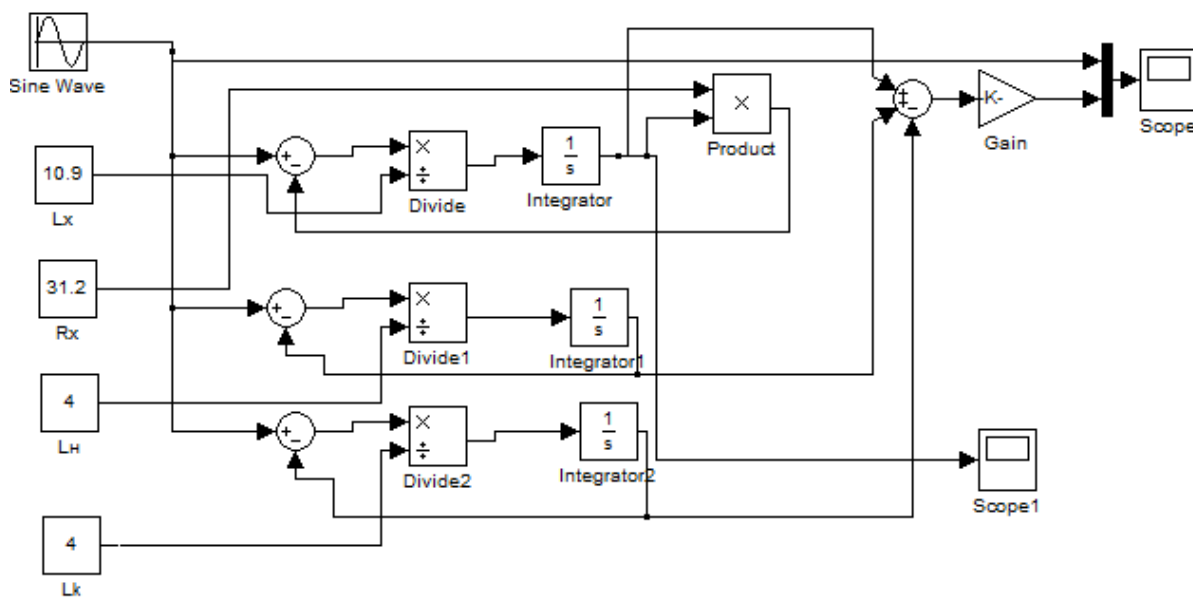


Рис. 4. Модель трехэлементной схемы замещения ПВП без учета влияния температуры

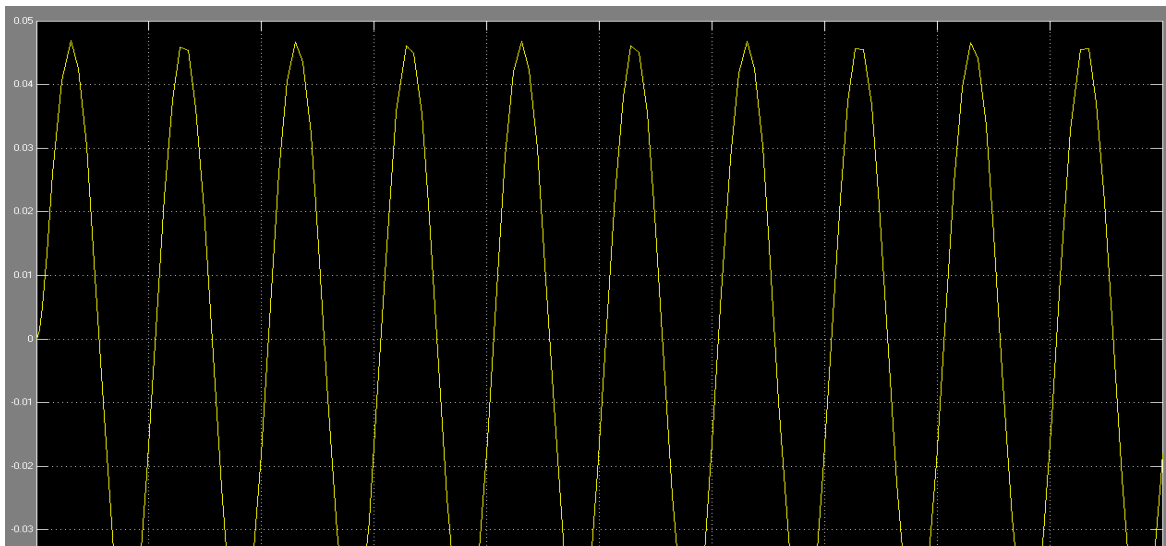


Рис. 5. Выходной ток трехэлементной схемы замещения без влияния температуры



Рис. 6. Выходной ток трехэлементной схемы замещения с учетом влияния температуры

Как уже было выше упомянуто в статье, изготовить две полностью идентичные катушки невозможно, поэтому помимо изменения параметров схемы замещения от температуры, проведем расчет выходных токов ПВП при условии неполной компенсации неинформативного параметра L_n .

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты изменения тока ПВП от температуры (k_1)
и от неполной компенсации неинформативного параметра L_n

$\Delta I, A$	K_2						
	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	
K_1	1,0	0,062	0,061	0,060	0,059	0,058	0,057
	1,02	0,061	0,059	0,058	0,056	0,054	0,053
	1,04	0,060	0,058	0,056	0,054	0,052	0,050
	1,06	0,059	0,056	0,054	0,052	0,050	0,047
	1,08	0,058	0,054	0,052	0,049	0,046	0,044
	1,1	0,057	0,053	0,050	0,047	0,045	0,042

Для того, чтобы численно оценить влияние температуры и неполной компенсации неинформативного параметра $L_{Ц}$, необходимо оценить относительную погрешность по формуле

$$\delta_i = \left| \frac{I_{\text{ВЫХ(НУ)}} - I_{\text{ВЫХ}(K_1, K_2)}}{I_{\text{ВЫХ}(K_1, K_2)}} \right| \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Таблица 2

Результаты определения относительной погрешности.

$\delta_i, \%$	K_2						
K_1		1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1
	1,0	0	1,61	3,23	4,84	6,45	8,06
	1,02	1,61	4,84	6,45	9,68	12,9	14,52
	1,04	3,23	6,45	9,68	12,9	16,13	19,35
	1,06	4,85	9,68	12,9	16,13	19,35	24,12
	1,08	6,45	12,9	16,13	20,97	20,97	29,03
	1,1	8,06	14,52	19,35	24,19	27,44	32,26

Таким образом, используя квазидифференциальную схему включения, можно проводить измерение информативного параметра, зависящего только от перемещения, а неинформативный параметр компенсировать введением дополнительной компенсационной катушки. Разработанная модель, представленная на рис. 3, позволила помимо исследования температурной погрешности провести анализ влияния некомпенсации начальной индуктивности с учетом влияния температурного воздействия. Таблица 2 позволяет сделать вывод, что при совместном влиянии температуры и при неполной компенсации неинформативного параметра на 10 % относительная погрешность будет составлять 32,26 %. Из приведенных расчетов вытекает требование идентичности изготовления измерительной и компенсационной катушек.

Библиографический список

1. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 144 с.
2. Эйкофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкофф. – Москва : Наука, 1975.
3. Соболев, В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
4. Пат. 2487314 Российская Федерация. Вихретоковый преобразователь перемещений / В. П. Маланин, В. Н. Колганов, М. Д. Пресняков, С. В. Абрамов. – Опубл. 10.07.2013.
5. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 688 с.
6. Абрамов, С. В. Сравнительный анализ схем замещения первичных вихретоковых / С. В. Абрамов, В. П. Маланин // Приборы. – 2015. – № 9. – С. 20–27.
7. Маланин, В. П. Повышение информативной способности вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, С. В. Абрамов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 76–81.

References

1. Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya: ucheb. posobie* [Identification of objects of control : tutorial]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2006, 144 p. [In Russian]
2. Eykoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Basic identification of control systems]. Moscow: Nauka, 1975. [In Russian]
3. Sobolev V. S., Shkarlet Yu. M. *Nakladnye i ekrannye datchiki* [Overhead and screen sensors]. Novosibirsk: Nauka, 1967, 144 p. [In Russian]

4. Pat. 2487314 Russian Federation. *Vikhretokovyy preobrazovatel" peremeshcheniy* [Pat. 2487314 Russian Federation. Eddy current displacement transducer]. V. P. Malanin, V. N. Kolganov, M. D. Presnyakov, S. V. Abramov. publ. 10.07.2013. [In Russian]
5. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t.* [Non-destructive testing : Handbook : in 7 vol.]. General ed. V. V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2003, vol. 2, 688 p. [In Russian]
6. Abramov S. V., Malanin V. P. *Pribory* [Instrumentation]. 2015, no. 9, pp. 20–27. [In Russian]
7. Malanin V. P., Abramov S. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 76–81. [In Russian]

Абрамов Сергей Владимирович

ведущий инженер,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: abramov2011s@mail.ru

Abramov Sergey Vladimirovich

leading engineer,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ульянин Николай Сергеевич

ведущий инженер,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: kolanul@mail.ru

Ul'yanin Nikolay Sergeevich

leading engineer,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Абрамов, С. В. Исследование влияния температурной погрешности вихретокового преобразователя перемещений с учетом влияния неполной компенсации неинформативного параметра / С. В. Абрамов, Н. С. Ульянин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 38–44. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-5.