

Верификация расчетной формулы интеллектуального датчика температуры

БЕКБАЕВ А.Б., ШЕРЫШЕВ В.П., САРСЕНБАЕВ Е.А.

Предложен подход к верификации расчётной формулы интеллектуального датчика температуры недоступной поверхности (ИД ТНП) по данным имитационного моделирования температуры поверхности, находящейся под электрическим напряжением. Показано, что введением в формулу пяти поправочных коэффициентов абсолютная погрешность измерения температуры с помощью ИД ТНП может быть сведена к одному градусу.

Ключевые слова: поверхность под напряжением, датчик температуры, имитационное моделирование, расчет

Измерение температуры поверхности, находящейся под высоким электрическим напряжением с помощью термопар [1], часто осложняется наличием наводок значительно превышающих величину полезного сигнала – ЭДС термопары. С целью преодоления указанной трудности в [2] предложен способ измерения температуры поверхности токоведущей шины с помощью терморезистора, помещённого в металлический стакан, заполненный парафином, на расстоянии от дна стакана, обеспечивающем электрическую прочность. Основным недостатком данного способа, понижающим точность измерений, является отсутствие учёта падения температуры на слое парафина, отделяющего терморезистор от дна металлического стакана, прикреплённого вплотную к шине. Если трактовать поверхность токоведущей шины как поверхность, недоступную для прямых измерений температуры, то для повышения точности измерений можно использовать интеллектуальный датчик температуры недоступной поверхности (ИД ТНП) [3].

В статье предложен подход к верификации ИД ТНП, основанный на имитационном моделировании температуры поверхности, находящейся под электрическим напряжением.

Измерение температуры, находящейся под электрическим напряжением поверхности, принципиально может быть осуществлено с помощью устройства, представленного на рис. 1.

Устройство состоит из изготовленного из парафина круглого стержня 3, изолированного с боковой поверхности и с верхнего торца теплоизолятором 2. На контакте стержня с шиной и на расстоянии d от контактной поверхности, обеспечивающем электрическую прочность, размещаются термочувствительные элементы датчиков температуры 4 и 5.

Смоделированные данные о температуре чувствительного элемента 4, полученные по расчётной

формуле, реализованной на компьютере 6, через шину USB передаются в микроконтроллер 7, в котором смоделированная по расчётной формуле температура чувствительного элемента 4 пересчитывается в модельную температуру гипотетического элемента 5 и передаётся опять через шину USB в память компьютера 6.

Расчётная формула. Температура поверхности, находящейся под электрическим напряжением, вычисляется по формуле

$$T_1(t^{(k)}) = k_1 q_1 \frac{d}{l} [0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}} - \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \frac{\ddot{y}}{p} + P_m(\bar{t}^{(k)}) \frac{\ddot{y}}{p} + T_0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $T_1(t^{(k)})$ – модельная температура чувствительного элемента 5; $t^{(k)}$ – отсчёт времени; $\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})$ – безразмерная модельная температура чувствительного элемента 4; $\bar{t}^{(k)}$ – безразмерное время; $T_2(t^{(k)})$ – измеренная температура чувствительного элемента 4; d – толщина слоя парафина; l – теп-

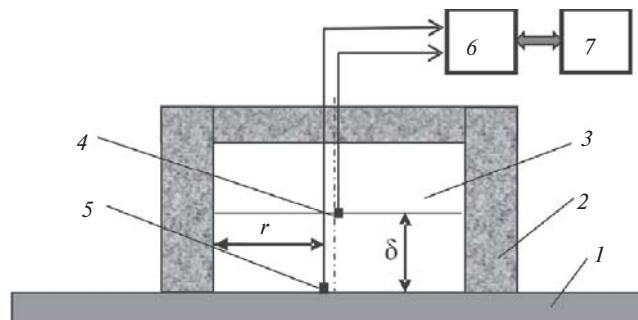


Рис. 1. Схема моделируемого измерительного процесса: 1 – шина, находящаяся под электрическим напряжением; 2 – теплоизолирующая цилиндрическая оболочка; 3 – пространство, заполненное парафином; 4, 5 – чувствительные элементы датчиков температуры; 6 – компьютер; 7 – микроконтроллер

лопроводность парафина; c – удельная теплоемкость парафина; q_1 – удельный тепловой поток через нижнее основание цилиндрического слоя парафина; k_1, k_2 – первый и второй поправочные коэффициенты; d/l – термическое сопротивление слоя парафина; $P_m(\bar{t}^{(k)})$ – полином, компенсирующий методическую погрешность; m – степень полинома; T_0 – начальная температура образца парафина; k – текущий номер измерения; n – общее число измерений.

Безразмерная температура чувствительного элемента 4

$$\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) = \frac{l - (T_2(t^{(k)}) - T_0)}{q_1 d}; \quad (2)$$

безразмерное время

$$\bar{t}^{(k)} = \frac{ct^{(k)}}{ld^2}. \quad (3)$$

Вывод расчётной формулы. Цилиндрический образец парафина выполнен в виде диска (т.е. $r \gg d$, рис. 1). Температурное поле образца удовлетворяет одномерному уравнению теплопроводности с граничными условиями второго рода (на поверхностях диска заданы удельные тепловые потоки). С помощью (2) и (3) краевая задача теплопроводности второго рода приводится к безразмерному виду [4, 5]. Для определения связи между значениями температуры чувствительных элементов 4 и 5 вводится в рассмотрение безразмерная температура срединной поверхности слоя парафина толщиной d $q = \frac{\bar{T}_1 + \bar{T}_2}{2}$ и решается дифференциальное уравнение [4]:

$$0,25 \frac{dq}{dt} + q = 0,5 + \bar{T}_2; \quad q(0) = 0. \quad (4)$$

Безразмерная температура чувствительного элемента 4 представляет собой кусочно-постоянную функцию, поэтому на каждом шаге постоянства правой части решение дифференциального уравнения (4) имеет вид

$$q(\bar{t}^{(k)}) = [0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] \cdot [1 - e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}}] \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

В полученное решение (с учётом формулы осреднения) вводятся поправочные коэффициенты k_1 и k_2 :

$$\bar{T}_1(\bar{t}^{(k)}) = k_1 [0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] \cdot [1 - e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}}]$$

$$- \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \cdot \frac{\ddot{y}}{p}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Первый коэффициент определяется методом наименьших квадратов с использованием точного решения задачи теплопроводности, представленного таблицей (табл. 1, [5]), по формуле

$$k_1 = \frac{\sum_{k=1}^n T_{\text{то}}(\bar{t}^{(k)}) \cdot [0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] \cdot [1 - e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}}] \cdot \ddot{y}}{\sum_{k=1}^n [0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] \cdot [1 - e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}}] \cdot \ddot{y}} \quad (7)$$

$$\frac{-\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \cdot \ddot{y}}{-\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \cdot \ddot{y}^2}$$

Момент безразмерного времени $\bar{t}^{(k)}$	Значение безразмерной температуры	
	для элемента 5 $T_{\text{то}}(\bar{t}^{(k)})$ — точное	для элемента 4 $\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})$
0,01	0,112838	0,000014
0,02	0,159577	0,000802
0,03	0,195441	0,003722
0,04	0,225626	0,008754
0,05	0,252313	0,015366
0,06	0,276395	0,023074
0,07	0,298541	0,031528
0,08	0,319154	0,040486
0,09	0,338514	0,049784
0,10	0,356826	0,059311
0,11	0,374245	0,068992
0,12	0,390892	0,078777
0,13	0,406863	0,088632
0,14	0,42224	0,098598
0,15	0,437089	0,108469
0,16	0,451466	0,118425
0,17	0,465422	0,128395
0,18	0,479000	0,138375
0,19	0,492236	0,148361
0,20	0,505165	0,158352

При этом считается, что слой парафина нагревается от шины постоянным тепловым потоком. В таблице приведены точные значения безразмерной температуры $T_{\text{ТО}}(\bar{t}^{(k)})$ и значения безразмерной модельной температуры $\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})$ для чувствительных элементов 5 и 4 соответственно.

Первый поправочный коэффициент, вычисленный по формуле (7), равен 0,415; второй коэффициент, определяемый методом случайного поиска и обеспечивающий минимальное отклонение рассчитанного по формуле (6) значения модельной температуры чувствительного элемента 5 от точного решения модельной задачи, приведенного далее, равен 4,0 (рис. 2).

На рис. 3 приведены результаты восстановления безразмерной температуры чувствительного элемента 5, полученные при $k_1 = 0,415$ и $k_2 = 4$.

Для дальнейшего уточнения в приближённую расчётную формулу (6) вводится компенсирующий

методическую погрешность интерполяционный полином $P_m(\bar{t}^{(k)})$:

$$T_1(\bar{t}^{(k)}) = k_1 \left[2[0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] e^{-k_2 \frac{\bar{t}^{(k)}}{0,25}} - \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \right] + P_m(\bar{t}^{(k)}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

В простейшем случае это интерполяционный полином второй степени:

$$P_m(\bar{t}^{(k)}) = a_0 + a_1 \bar{t}^{(k)} + a_2 (\bar{t}^{(k)})^2. \quad (9)$$

Для определения коэффициентов полинома a_0, a_1, a_2 отклонение модельного значения от точного решения представляется формулой

$$D(\bar{t}) = \bar{T}_{\text{ТО}}(\bar{t}) - \bar{T}_1(\bar{t}), \quad \bar{t} \in [\bar{t}^{(1)}, \bar{t}^{(20)}]. \quad (10)$$

Вычисляя $\bar{T}_1(\bar{t}^{(k)})$ в трёх точках $\bar{t}^{(3)} = 0,03; \bar{t}^{(9)} = 0,09; \bar{t}^{(20)} = 0,20$ на заданном интервале безразмерного времени по данным численного эксперимента и таблицы по формуле (6), определяются базовые значения отклонений:

$$\begin{aligned} D_1 &= D(\bar{t}^{(3)}) = \bar{T}_{\text{ТО}}(\bar{t}^{(3)}) - \bar{T}(\bar{t}^{(3)}); \\ D_2 &= D(\bar{t}^{(9)}) = \bar{T}_{\text{ТО}}(\bar{t}^{(9)}) - \bar{T}(\bar{t}^{(9)}); \\ D_3 &= D(\bar{t}^{(20)}) = \bar{T}_{\text{ТО}}(\bar{t}^{(20)}) - \bar{T}(\bar{t}^{(20)}); \end{aligned} \quad (11)$$

которые равны: $D_1 = 0,00822; D_2 = -0,022; D_3 = 0,0341$.

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 находим как решение системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} a_0 + 0,03a_1 + 0,0009a_2 &= 0,00822; \\ a_0 + 0,09a_1 + 0,0081a_2 &= -0,022; \\ a_0 + 0,2a_1 + 0,04a_2 &= 0,0341, \end{aligned} \quad (12)$$

откуда

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{0,0000442}{0,001122} = 0,0394; \quad a_1 = \frac{-0,00137}{0,001122} = -1,21925; \\ a_2 &= \frac{0,0669}{0,001122} = 5,962567, \end{aligned} \quad (13)$$

что в итоге позволяет записать расчётную формулу для определения безразмерной температуры поверхности, находящейся под электрическим напряжением в виде:

$$\bar{T}_1(\bar{t}^{(k)}) = 0,0415 \left[2[0,5 + \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)})] e^{-\frac{\bar{t}^{(k)}}{0,0625}} - \bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \right] + 0,0394 - 1,21925 \bar{t}^{(k)} + 5,962567 (\bar{t}^{(k)})^2$$



Рис. 2. Результаты численного эксперимента по определению второго поправочного коэффициента

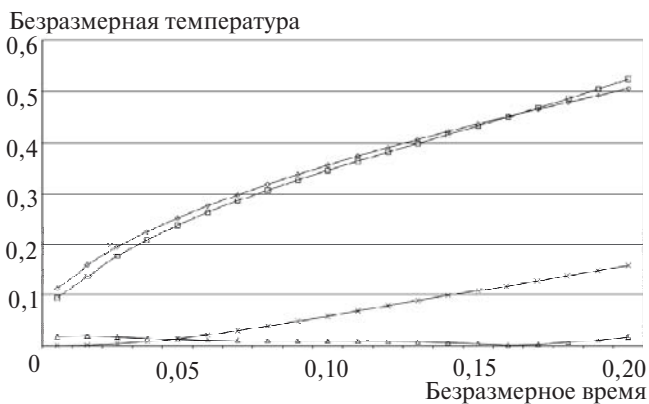


Рис. 3. Результаты численного эксперимента ($k_2 = 4$): \diamond – точное решение задачи теплопроводности; \square – температура чувствительного элемента 5, рассчитанная по (6); \cdot – модельная температура чувствительного элемента 4 (рис. 1); \triangle – модуль разности точной и смоделированной температуры чувствительного элемента 5

$$-\bar{T}_2(\bar{t}^{(k)}) \ddot{y} + 0,0394 - 1,21925\bar{t}^{(k)} + 5,962567(\bar{t}^{(k)})^2, \\ k = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Простые преобразования с учётом соотношений (2) и (3) позволяют перейти от (14) к окончательной записи расчётной формулы (1), реализованной в микроконтроллере ИД ТНП [3].

Тестовая задача. Для проверки правильности расчётной формулы (1) для случая интерполяционного полинома второй степени и пяти поправочных коэффициентов (режимных параметров): $k_1 = 0,415$; $k_2 = 4$; $a_0 = 0,0394$; $a_1 = -1,21925$; $a_2 = 5,962567$ была сформулирована тестовая задача: необходимо выполнить пересчёт значений модельной температуры чувствительного элемента 4 (третья колонка таблицы) по формуле (14) в температуру чувствительного элемента 5 с использованием следующих данных: толщина слоя парафина $d = 0,006362$ м; теплопроводность $l = 0,26$ Вт/(мЖ); удельная теплоемкость $c = (1,93E+0,6)$ Дж/(кгЖ); удельный тепловой поток $q = (3,30E+0,03)$ Вт/м²; начальная температура $T_0 = (2,00E+0,1)$ °С.

Температура, °С

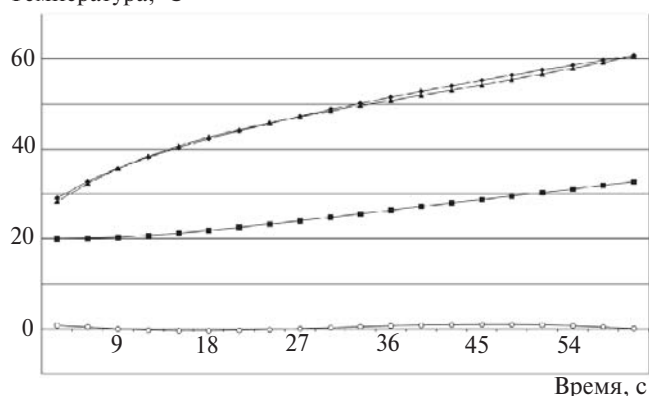


Рис. 4. Результаты численного эксперимента: \triangle — точное решение задачи теплопроводности; \diamond — температура чувствительного элемента 5, рассчитанная по формуле (14); \square — модельная температура чувствительного элемента 4; \circ — модуль разности точной и смоделированной температуры чувствительного элемента 5

На рис. 4 представлены результаты численного эксперимента по вычислению температуры чувствительного элемента 5.

Результаты численного эксперимента, представленные на рис. 4, показывают, что использование показаний датчика с чувствительным элементом 4, расположенным в парафине на расстоянии порядка 6 мм от шины, в качестве показаний чувстви-

тельного элемента 5 могут приводить к абсолютной погрешности измерений порядка 20 °С. Если же методика измерений температуры находящейся под электрическим напряжением поверхности базируется на использовании ИД ТНП, реализующим расчётную формулу (14) при токе, приводящем к удельному тепловому потоку 3,3 кВт/м² с поверхности шины, то может быть достигнута абсолютная погрешность измерений, не превышающая 1 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 513271 (СССР). Устройство для измерения температуры поверхности/Г.Я. Андреев, А.Б. Толокнов, Б.М. Арпентьев и др. — БИ, 1977, № 16, 3 с.
2. Патент 2272261 (РФ). Устройство для измерения температуры поверхности, находящейся под электрическим напряжением/А.Н. Антоненков, А.И. Бессонов, Л.Е. Герцман, В.А. Мельников, А.Д. Пинтюшенко. Оpubл. 20.03.2006.
3. Бекбаев А.Б., Жалмухамед Е., Утебаев Р.М., Колтун Н.А. Лабораторная экспериментальная установка для испытания интеллектуального датчика температуры недоступной поверхности. — Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2013, № 6(100), с. 36–42.
4. Бекбаев А.Б., Карбозова А.М., Шерышев В.П. Контроль теплового состояния электрического контакта. Научно-технический журнал (Кременчуг). Тематический выпуск: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», 2012, вып. 3/2012 (19), с. 575–578.
5. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. (мл.) Некорректные обратные задачи теплопроводности/Пер. с англ. — М.: Мир, 1989, 312 с.

[23.11.15]

Авторы: Бекбаев Амангельды Бекбаевич окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института в 1968 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка САР зерноперерабатывающих предприятий с имитационной моделью» в Казахском политехническом институте (ныне Казахский национальный исследовательский технический университет — КНИТУ). Заведующий кафедрой КНИТУ.

Шерышев Валерий Павлович окончил физико-математический факультет Казахского государственного университета в 1976 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию «Моделирование и идентификация процессов теплопереноса с использованием концепции сосредоточенной емкости» в Институте проблем машиностроения НАН Украины. Профессор кафедры «Электроэнергетика и автоматизация технологических комплексов» КНИТУ.

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович окончил инженерно-механический факультет Жезказганского университета в 2001 г. Докторант кафедры «Электроэнергетика и автоматизация технологических комплексов» КНИТУ.

Reification of the Calculated Formula Intellectual Temperature Sensor

BEKBAYEV Amangel'dy Bekbayevich (*Kazakh National Research Technical University (KNRTU), Almaty, Kazakhstan*) – Head of the Department, Dr.Sci. (Eng.)

SHERYSHEV Valerii Pavlovich (*KNRTU, Almaty, Kazakhstan*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

SARSENBAYEV Erlan Aliaskarovich (*KNRTU, Almaty, Kazakhstan*) – Doctoral Student

An approach is proposed for verifying the calculation formula for a smart sensor intended for measuring the temperature of inaccessible surface (IST SS) based on the data from simulating the temperature of a surface to which a voltage is applied. It is shown that the absolute error of temperature measurement by means of an IST SS can be reduced to one degree by introducing five correction coefficients in the formula.

Key words: *surface to which voltage is applied, temperature sensor, simulation, calculation*

REFERENCES

1. **A.c. No. 51327 (SSSR).** *Ustroistvo dlya izmereniya temperatury poverkhnosti* (Apparatus for measuring the surface temperature)/G.Ya. Andreyev, A.B. Toloknov, B.M. Arpent'yev et al. Bulletin of inventions, 1977, No. 16.

2. **Patent RF No. 2272261.** *Ustroistvo dlya izmereniya temperatury poverkhnosti, nakhodyashcheysya pod napryazheniyem* (Apparatus for measuring the surface temperature of which is energized)/A.N. Antonenkov, A.I. Bessonov, L.Ye. Gerzman, V.A. Mel'nikov, A.D. Pintyushenkov. Publ. 20.03.2006.

3. **Bekbayev A.B., Zhalmukhamed Ye., Utebayev R.M., Koltun N.A.** *Vestnik Kazakhskogo national'nogo nauchno-tekhnicheskogo*

universiteta – in Russ. (Bull. of Kazakh scientific-technical University), 2013, No. 6(100), pp. 36–42.

4. **Bekbayev A.B., Karbozova A.M., Sheryshev V.P.** *Nauchnj-tekhnicheskii zhurnal (Kremenchug) – in Russ. (Scientific-technical journal (Kremenchug), 2012, iss. 3(19), pp. 575–578.*

5. **Beck G., Blackwell B., St. Clair Ch. (Jun.).** *Nekorrektnye obratnye zadaxhi teploprovodnosti/Per. s angl. (Incorrect inverse head condition problems/Transl. from English). Moscow, Publ. «Mir», 1989, 312 p.*

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru
Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: etr1880@mail.ru

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
проводят 3 июня 2016 г. X Всероссийскую научно-техническую конференцию

**«ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ»
(ИТЭЭ-2016)**

Тематические направления конференции:

Теоретические основы информатизации в электротехнике и электроэнергетике.
Математическое моделирование и комплексы программ.
Системы управления техническими объектами.
Цифровая обработка сигналов в электротехнике, радиоэлектронике и электроэнергетике.
Микро- и нанoeлектроника в информационных устройствах, фотовольтаические преобразователи и сенсоры.
Цифровые сети и системы телекоммуникаций.
Релейная защита и автоматика энергосистем.
Новые информационные технологии и высшее электротехническое и электроэнергетическое образование.

Место проведения конференции:

г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15,
ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Публикация материалов конференции:

К началу работы ИТЭЭ-2016 будет выпущен сборник материалов конференции.
Сборнику присваиваются соответствующие библиотечные индексы УДК, ББК и международный стандартный книжный номер (ISBN). Информация о сборнике в целом и о каждой публикации, в т.ч. списки источников (литературы), будет включена в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), а материалы участников конференции будут размещены в Научной электронной библиотеке (НЭБ) на сайте elibrary.ru (договор № 2745-12/2014К). Проводится обязательная рассылка сборника материалов.

Сроки работы конференции:

Регистрация участников – 02.06.2016 г.
Работа секций – 03.06.2016 г.
Отъезд участников – 04.06.2016 г.

Заявка на участие в конференции:

фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, организация, E-mail, телефон для связи, нужен ли сертификат участника, нужно ли выслать сборник материалов конференции наложенным платежом (если да – дополнительно указать домашний адрес), вид участия (публикация и/или выступление с докладом), тематическое направление публикации, требуется ли гостиница и на какой срок.

Контакты оргкомитета конференции:

электронная почта itee-2016@mail.ru

Контактное лицо: Лазарева Надежда Михайловна,

почтовый адрес: 428015, Чебоксары, Московский проспект, д. 15, корп. В, каб. В-309, Белову Г.А.

контактный тел.: 8–960–301–09–21, сайт университета: <http://www.chuvsu.ru/>

Для участия в работе конференции необходимо выслать по электронной почте в адрес оргкомитета:

1. Заявку на участие в конференции по приведенной выше форме отдельно для каждого соавтора публикации.
2. Файл с текстом публикации на русском языке объёмом 2–4 полных страницы формата А5. Публикация материалов объёмом более 4-х страниц должна быть согласована с оргкомитетом.
3. Цветную скан-копию экспертного заключения (акта экспертизы) о возможности опубликования материалов в открытой печати (общее экспертное заключение по нескольким публикациям от одной организации приветствуется).
4. Цветную скан-копию платёжного документа об оплате оргвзноса.
5. Файл, содержащий информацию для размещения в НЭБ на сайте elibrary.ru: Фамилию, Имя, Отчество (полностью) и адрес электронной почты (e-mail) всех авторов, а также аннотацию и ключевые слова к публикации на русском языке.