

СОВРЕМЕННЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

А.С. Кириллов, В.И. Ярыгин

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1



Для определения характеристик термоэмиссионных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ) проводятся исследования и испытания, одним из этапов которых являются предреакторные испытания лабораторных термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) с плоской и цилиндрической геометрией электродов на стендах, оборудованных автоматизированными информационно-измерительными комплексами (ИИК). В ИИК проводят измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ТЭП совместно с измерениями температурных полей экспериментальных рабочего участка и стенда. Представлены структура и характеристики ИИК на базе продукции компании ICP DAS. Рассмотрена разработанная программа измерения ВАХ, предоставляющая оператору удобный графический интерфейс и возможность настройки параметров измерений. Определены погрешности регистрации ВАХ в ходе измерений с использованием имитаторов ТЭП. Погрешность в диффузионной части ВАХ (при токе менее 3 А) на имитаторе составляет не более 1%. Разработанный ИИК за счет использования современной элементной базы предоставляет расширенные функциональные возможности при измерении сигналов термопар экспериментального электрофизического стенда. Структура ИИК обеспечивает удобство масштабирования (увеличения количества измерительных каналов) и возможность добавления модулей других производителей. Опыт эксплуатации данного ИИК будет использован при разработке ИИК реакторного испытательного комплекса, предназначенного для выполнения аналогичных функций.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь, информационно-измерительный комплекс, вольт-амперная характеристика, термопары, импульсный режим.

ВВЕДЕНИЕ

ТЯЭУ была и остается одним из перспективных источников электропитания космических аппаратов различного назначения [1, 2]. В последнее десятилетие также ведутся НИОКР по разработке наземных термоэмиссионных энергетических установок с ядерным и газопламенным нагревом [3]. Для определения характеристик ТЯЭУ

© А.С. Кириллов, В.И. Ярыгин, 2018

при расчетной [4] и экспериментальной оптимизации характеристик термоэмиссионного рабочего процесса и его «внутренних» параметров [5] проводятся исследования и испытания, одним из этапов которых являются предреакторные испытания лабораторных ТЭП с плоской и цилиндрической геометрией электродов на электрофизических стендах. В ходе предреакторных испытаний моделируются различные режимы ТЭП и условия работы электродов электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) с использованием различных рабочих участков с ТЭП и ЭГЭ, оборудованных автоматизированными ИИК [6, 7].

В ИИК проводят измерения ВАХ ТЭП/ЭГЭ совместно с измерениями температурных полей экспериментальных рабочего участка и стенда [8]. Сигналы с датчиков поступают на входы устройств ввода-вывода, подключенных к компьютеру [9, 10]. Данные измерений после предварительной обработки отображаются на экране монитора компьютера в режиме реального времени и регистрируются для дальнейшей обработки и наполнения баз данных, используемых при расчете характеристик электрогенерирующего канала (ЭГК) ТЯЭУ [11, 12].

ВАХ ТЭП/ЭГЭ – зависимость плотности электрического тока j от его напряжения U – имеет сложный нелинейный характер и является функцией шести основных параметров [13]:

- температуры эмиттера T_E ;
- температуры коллектора T_C ;
- работы выхода электронов эмиттера Φ_E ;
- работы выхода электронов коллектора Φ_C ;
- давления пара цезия P_{Cs} (температуры цезиевого резервуара T_{Cs});
- величины межэлектродного зазора (МЭЗ) d .

В процессе одной экспериментальной серии измерений, как правило, пять из этих параметров поддерживают постоянными, а изменяют один из них. В результате получают одно семейство ВАХ. Набор семейств ВАХ, снятых импульсным методом при различных T_E , T_C , P_{Cs} (T_{Cs}) и d , входит в состав атласа ВАХ, являющийся исходным для определения внутренних параметров ТЭП/ЭГЭ.

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

ИИК позволяет измерять ВАХ как в статическом режиме (изомощностные ВАХ), так и в импульсном (изотермические ВАХ). Он предоставляет дополнительные диагностические возможности по определению внутренних параметров ТЭП/ЭГЭ по характерным точкам на ВАХ [5]. Изменение температуры электродов в импульсном режиме не должно превышать четырех градусов. Для выполнения этого условия разработан специальный алгоритм управления электрическим током ТЭП.

Разработаны два варианта ИИК (ИИК-75 и ИИК-600), в которых в зависимости от рабочей площади электродов испытываемого ТЭП/ЭГЭ для управления током применены силовые устройства с максимальным током в импульсе, соответственно 75 и 600 А, каждое из которых состоит из управляемого компьютером мощного двухтактного эмиттерного повторителя, собранного на параллельно включенных биполярных транзисторах типа КТ819. В качестве нагрузки эмиттерного повторителя подключен ТЭП/ЭГЭ. Управление силовым устройством производится от цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) платы PCI-1602F компании ICP DAS (известного производителя оборудования для систем сбора данных и управления) [14, 15], установленной в слоте PCI материнской платы компьютера (с операционной системой не ниже Windows XP) (рис. 1).

Управляющее напряжение, формируемое программой измерения ВАХ VAC_Temp , имеет ступенчато-пилообразную форму (рис. 2) [6]. На каждой ступени измеряют-

ся ток I и напряжение U соответственно с шунта (прецизионного сопротивления с двумя выводами для включения в цепь и двумя выводами для снятия напряжения, пропорционального величине измеряемого в цепи тока) [16] и потенциометрических выводов ТЭП/ЭГЭ с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) платы PCI-1602F. Параметры управляющего напряжения (число и длительность ступеней) могут варьироваться оператором в широких пределах. Длительность ступени составляет не более 1 мс, суммарное количество точек ВАХ – не менее 200.

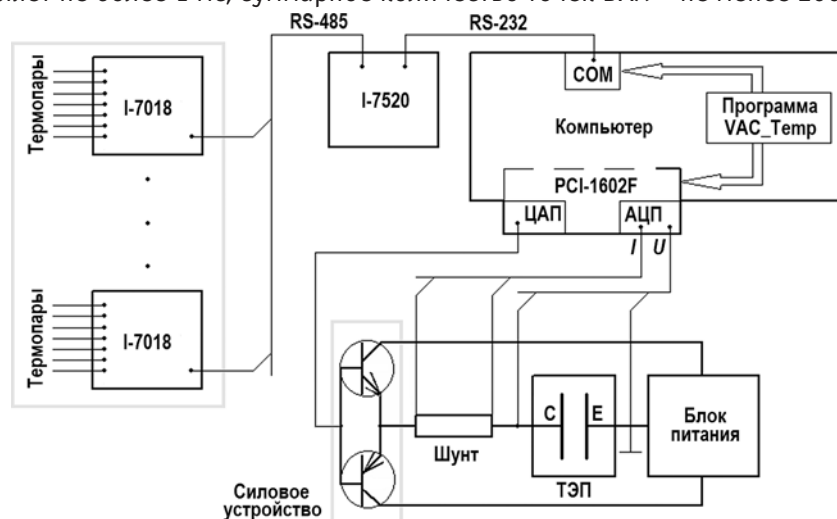


Рис. 1. Структурная схема ИИК

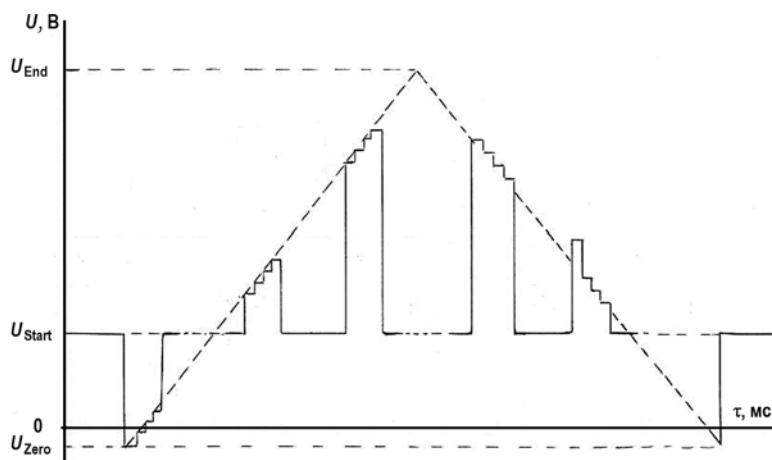


Рис. 2. Форма управляющего сигнала для снятия ВАХ

Технические характеристики PCI-1602F приведены в табл. 1 [14].

В ИИК используется несколько шунтов класса точности 0.2, рассчитанных на различные диапазоны тока. В процессе измерений оператор ИИК с помощью ручного пульта управления переключает полярность тока для снятия прямой (эмиттерной) или обратной (коллекторной) ветви ВАХ и подключает один из шунтов для получения максимальной чувствительности измерительного канала в выбранном диапазоне изменения тока.

Падение напряжения на шунте при номинальном токе составляет 75 мВ, но в импульсном режиме допустимое превышение номинального тока составляет не менее 300%. Это позволяет значительно увеличить напряжение на входе АЦП и,

как следствие, уменьшить погрешность измерения.

Таблица 1

Характеристики РСІ-1602F

Разрядность ЦАП	12 бит
Диапазон выходного напряжения ЦАП	±10 В; ±5 В;
Разрядность АЦП	16 бит
Диапазон входного напряжения АЦП	±10 В; ±5 В; ±2.5 В; ±1.25 В
Количество дифференциальных каналов АЦП	16
Максимальная частота выборки АЦП	2·10 ⁵ Гц

Для измерения температуры в ИИК используются термопары типа «хромель-алюмель» при температуре от 0 до 1000 – 1300°С и «вольфрам-рений» при температуре от 1300 до 2000°С и выше [17]. Показания термопар измеряются специализированными модулями ввода сигналов термопар типа I-7018 компании ICP DAS (см. рис. 1), которые относятся к категории интеллектуальных средств измерений – устройств с расширенными функциональными возможностями за счет встроенного микропроцессора [18] и обладают следующими достоинствами:

- программная компенсация температуры холодного спая;
- автоматическое преобразование значения термоЭДС в значение температуры с помощью градуировочной таблицы или полинома;
- цифровая фильтрация входных сигналов;
- диагностика обрыва линий связи с термопарами;
- защита от сбоев в работе компьютера за счет применения двойного сторожевого таймера [14, 19].

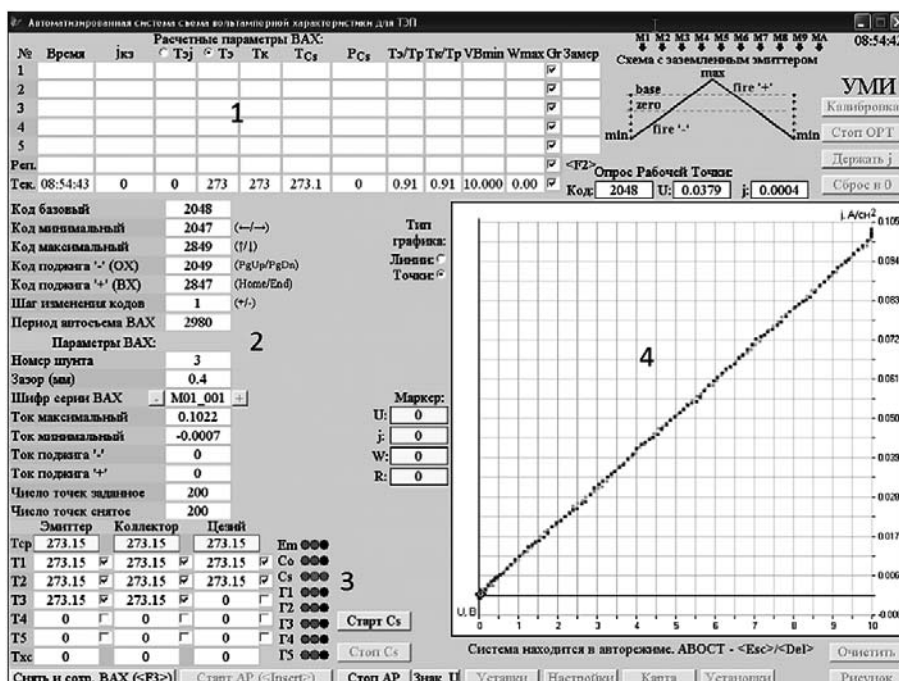


Рис. 3. Главное окно программы измерения ВАХ: 1 – поле параметров последних зарегистрированных ВАХ; 2 – поле настроек алгоритма управления током; 3 – поле данных измерения температуры эмиттера, коллектора и цезиевого резервуара; 4 – поле графика ВАХ

Основная погрешность I-7018 составляет 0.1%. В ИИК используется несколько модулей I-7018, объединенных в сеть для передачи сигналов нескольких десятков термопар. Связь модулей I-7018 с компьютером осуществляется через преобразователь интерфейса I-7520 и последовательный COM-порт.

Разработанная программа VAS_Temp предоставляет оператору удобный графический интерфейс и возможность настройки большого числа параметров измерения ВАХ и показаний термопар. Управление модулями I-7018 и платой PCI-1602F происходит с помощью набора драйверов. Главное окно программы (рис. 3) содержит данные измерений и основные параметры измерительного процесса. Программный код, созданный на языке C, можно разделить на следующие части:

- реализация алгоритма управления током и измерения ВАХ;
- опрос сигналов термопар и пересчет по градуировочным таблицам;
- создание графического интерфейса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ

С целью определения точности измерения ВАХ в ИИК-75 были проведены измерения с использованием имитаторов ТЭП – образцовых сопротивлений класса точности 0.02. Номиналы сопротивлений: $R_1 = 0.001 \text{ Ом}$, $R_2 = 0.01 \text{ Ом}$, $R_3 = 1 \text{ Ом}$, $R_4 = 100 \text{ Ом}$.

Измерения проводились в диапазонах напряжения U от -10 до $+10 \text{ В}$ и тока I от -20 до $+70 \text{ А}$. В таблице 2 приведены сопротивления и номинальные токи используемых в ИИК-75 измерительных шунтов.

Таблица 2

Характеристики измерительных шунтов

Номер шунта	$R_{ш}$, Ом	$I_{ном}$, А
1	0.0015	50
2	0.0075	10
3	0.1	0.75

Перед измерениями была проведена калибровка измерительных каналов с использованием образцового цифрового вольтметра Agilent 34401A [20]. В ходе калибровки одновременно на вход АЦП PCI-1602F и образцового вольтметра подавалось ступенчато изменяющееся напряжение. На каждой ступени измерялось напряжение вольтметром и считывались показания с экрана монитора компьютера. В результате были получены зависимости показаний PCI-1602F от показаний образцового прибора и внесены калибровочные коэффициенты в память программы снятия ВАХ.

Обработка результатов измерений проводилась по следующему алгоритму.

1. Для каждого сочетания образцового сопротивления R , полярности тока и измерительного шунта регистрировался массив данных $I(U)$ (число точек в каждом диапазоне тока $N > 100$).

2. Для каждой точки i вычислялось сопротивление

$$R_i = U_i / I_i. \quad (1)$$

3. Вычислялась средняя относительная погрешность измерения сопротивления в выбранном диапазоне тока

$$\langle \delta \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R - R_i| / R. \quad (2)$$

Таблица 3

Погрешности измерения сопротивления

Образцовое сопротивление R , Ом	Полярность тока	Шунт	Диапазон тока, А		
			Погрешность $\langle \delta \rangle$, %		
			1 – 5	5 – 10	> 10
0.001	+	1	4.9	1.9	0.8
0.001	+	2	6.1	1.8	0.8
0.001	-	2	4.8	2.0	1.1
			0.2 – 1	1 – 5	> 5
0.01	+	1	10	2.3	0.9
0.01	+	2	3.5	1.0	0.9
0.01	-	2	3.8	1.3	1.0
			0.01 – 0.05	0.05 – 0.2	0.2 – 1
1	+	3	2.5	0.7	0.4
1	-	3	1.9	0.5	0.2
			0.01 – 0.02	0.02 – 0.05	0.05 – 0.1
100	+	3	3.3	1.3	0.7
100	-	3	2.6	1.4	0.8

В таблице 3 представлены результаты вычисления погрешностей, откуда следует, что при

- $R > 0.001$ Ом погрешность не превышает 2% ($I > 10$ А);
- $R < 100$ Ом погрешность не превышает 1% ($I > 50$ мА).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный ИИК за счет использования современной элементной базы предоставляет расширенные функциональные возможности при измерении сигналов термодинамического экспериментального электрофизического стенда. Погрешность измерения диффузионной части ВАХ ($I < 3$ А) в импульсном режиме на имитаторе ТЭП не превышает 1%.

По сравнению с ранее разработанным ИИК на основе модулей КАМАК [6] новый вариант ИИК является совместимым с интерфейсами современных компьютеров, снабжен программным обеспечением от производителя для наладки и диагностики модулей, допускает удобное масштабирование (увеличение количества измерительных каналов) с возможностью добавления модулей других производителей.

Опыт эксплуатации данного ИИК будет использован при разработке ИИК реакторного испытательного комплекса, предназначенного для выполнения аналогичных функций.

Литература

1. Ярыгин В.И. Ядерная энергетика прямого преобразования в космических миссиях XXI в. / Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – Вып. 2. – С. 5-20.
2. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. – М.: Атомиздат, 1977. – 240 с.

3. *Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В.* Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии / Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 364 с.
4. *Полоус М.А., Ярыгин В.И., Виноградов Е.Г.* Программный комплекс для трехмерного численного расчета тепловых и электрических характеристик многоэлементного электрогенерирующего канала термоэмиссионной ЯЭУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151-160.
5. *Ярыгин В.И.* Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Часть 2. Методы исследования, техника измерений характеристик и испытаний электродных материалов / Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 2006. – 64 с.
6. *Андриашин А.В., Мелета Е.А, Миронов В.С., Ярыгин В.И.* Базовый комплекс аппаратных, методических и программных средств для проведения экспериментальных исследований лабораторных ТЭП. Избранные труды ФЭИ. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1996. – С. 69-76.
7. *Ярыгин В.И., Агафонов В.Р., Тулин С.М., Медведев В.В., Кузнецов Р.В.* Экспериментальные исследования и испытания ТЭП (прибор 0100) в обоснование характеристик унифицированного ЭГК. / Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год. Научно-технический сборник. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – С. 404-409.
8. *Синявский В.В.* Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 375 с.
9. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
10. *Ширяев В.В.* Компьютерные измерительные средства: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 180 с.
11. *Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Смольникова Г.И.* Банк данных вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып.1. – С. 71-74.
12. *Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Петровский В. Г., Ярыгин В.И.* Компьютерный банк данных ВАХ ЭГК // Атомная энергия. – 2001. – Т. 91. – Вып.4. – С. 315.
13. *Пятницкий А.П., Сергеев Д.Н., Невежин О.А.* Вольт-амперные характеристики термоэмиссионных преобразователей. – М.: Атомиздат, 1967. – 151 с.
14. Сайт компании ICP DAS. Электронный ресурс: <http://www.icpdas.com/>. Дата обращения: 01.09.2017.
15. *Графкин А.В., Иоффе В.Г.* Архитектура автоматизированных систем на основе модулей ICP DAS серии I-7000: учебное пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 160 с.
16. *Колпаков А.И.* Резистивные токовые шунты для применений высокой мощности // Компоненты и технологии. – 2010. – №3. – С. 84-88.
17. *Арнольдов М.Н., Каржавин В.А., Трофимов А. И.* Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 243 с.
18. *Раннев Г.Г.* Интеллектуальные средства измерений. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 272 с.
19. *Кириллов А.С., Агафонов В.Р.* Интеллектуальные модули ввода сигналов термопар с объектов термоэмиссионной экспериментальной установки // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – №3. – С. 65-68.
20. Сайт компании Agilent Technologies. Электронный ресурс: <http://www.agitech.ru/>. Дата обращения: 01.09.2017.

Поступила в редакцию 11.01.2018 г.

Авторы

Кириллов Андрей Сергеевич, аспирант
E-mail: kir_obninsk@rambler.ru

Ярыгин Валерий Иванович, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н.
E-mail: ecs-yar@ippe.ru

THE MODERN INFORMATION-MEASURING COMPLEX FOR INVESTIGATIONS AND TESTS OF THERMIONIC HEAT TO ELECTRICITY CONVERTERS

Kirillov A.S., Yarygin V.I.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

A thermionic nuclear power plant (TNPP) is one of promising power sources for spacecrafts for various purposes. There are investigations and tests to determine characteristics of TNPP. The first test is the out-of-reactor test of laboratory thermionic converters (TIC) with flat and cylindrical geometry of electrodes on stands equipped by an automated information-measuring complex (IMC). The IMC carries out the following functions: measuring of TIC current-voltage characteristics (CVC) together with temperature fields in an experimental facility, preliminary data processing, displaying on a computer monitor screen in real-time and data logging on the operator request. The paper presents the structure and characteristics of the IMC developed on the basis of ICP DAS products. A PCI-1602F card is used to measure current and voltage of TIC, and I-7000 modules are used to measure thermocouple signals. The designed program for CVC measuring provides an operator with convenient graphical interface and the ability to change measurement parameters. Errors of CVC measuring are defined during test measurements by using TIC imitators. The developed IMC provides enhanced functionality in measuring of signals of thermocouples in an experimental facility. The measurement error in the diffusion part of the VAC (with TIC current less than 3 A) with a TIC imitator is less than 1%. The structure of IMC allows simple upgrades such as increasing of number of measuring channels and adding of modules from another vendor. Operating experience of this IMC will be used in the design of an IMC for a reactor testing facility to perform similar functions.

Key words: thermionic converter, information-measuring complex, current-voltage characteristic, thermocouples, pulsed mode.

REFERENCES

1. Yarygin V.I. Nuclear power of direct energy conversion in space missions of XXI century. *Izvestiya Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 2, pp. 5-20 (in Russian).
2. Kuznecov V.A. *Nuclear Reactors for Space Power plants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1977, 240 p. (in Russian).
3. Yarygin V.I., Rujnikov V.A., Sinyavsky V.V. *Space and Terrestrial Nuclear Power Plants of Direct Energy Conversion*. Moscow. NRNU «MEPhI» Publ., 2016, 364 p. (in Russian).
4. Polous M.A., Yarygin V.I., Vinogradov E.G. Software for three-dimensional numerical calculation of thermal and electrical characteristics of the multi-cell thermionic fuel element for thermionic NPP. *Izvestiya Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 151-160 (in Russian).
5. Yarygin V.I. *Physical Basis of Thermionic Conversion. Part 2. Methods of Investigation, Measurement Technique of Characteristics and Tests of Electrode Materials*. Obninsk. INPE Publ., 2006, 64 p. (in Russian).
6. Andriashin A.V., Meleta E.A., Mironov V.S., Yarygin V.I. *The Basic Complex of Hardware, Methodical and Software Tools for Experimental Research of Laboratory TIC*. Selected works of IPPE. Obninsk. IPPE Publ., 1996, pp. 69-76 (in Russian).

7. Yarygin V.I., Agafonov V.R., Tulin S.M., Medvedev V.V., Kuznecov R.V. *Experimental Investigations and Tests of TIC (Device 0100) in Support of Characteristics of Unified TFE*. The results of scientific-technical activities of the Institute of nuclear reactors and thermophysics for 2011. Scientific and technical collection. Obninsk. IPPE Publ., 2012, pp. 404-409 (in Russian).
8. Sinyavskij V.V. *Methods and Tools for Experimental Investigations and Reactor Tests of Thermionic Power Generating Assemblies*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2000, 375 p. (in Russian).
9. Denisenko V.V. *Computer Control of Technological Process, Experiment, Equipment*. Moscow. Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2009, 608 p. (in Russian).
10. Shirjaev V.V. *Computer Measuring Tools*. Tomsk, Tomsky Politehnicheskij Universitet Publ., 2009, 180 p. (in Russian).
11. Vinogradov E.G., Mironov V.S., Smolnikova G.I. The data bank of current-voltage characteristics of the thermionic converter. *Atomnaya energiya*, 2000, v. 89, iss. 1, pp. 71-74 (in Russian).
12. Vinogradov E.G., Mironov V.S., Petrovskij V. G., Yarygin V.I. The computer database of TFE CVC. *Atomnaya energiya*, 2001, v. 91, iss. 4, p. 315 (in Russian).
13. Pyatnickij A.P., Sergeev D.N., Nevezhin O.A. *Current-voltage Characteristics of Thermionic Converters*. Moscow. Atomizdat Publ., 1967, 151 p. (in Russian).
14. The site of ICP DAS company. Available at: <http://www.icpdas.com/> (accessed Sep. 1, 2017) (in Russian).
15. Grafkin A.V., Ioffe V.G. *The Architecture of Measurement Systems on the Base of I-7000 Modules of ICPDAS*. Samara. Samarsky Gosudarstvennyj Aerokosmicheskij Universitet Publ., 2009, 160 p. (in Russian).
16. Kolpakov A.I. Resistive current shunts for high power applications. *Komponenty i tehnologii*, 2010, no. 3, pp. 84-88 (in Russian).
17. Arnoldov M.N., Karzhavin V.A., Trofimov A.I. *The Basics of Metrological Support for Temperature Control of Reactor Facilities*. Moscow. MEI Publ., 2012, 243 p. (in Russian).
18. Rannev G.G. *Intelligent Measuring Tools*. Moscow. Akademiya Publ., 2010, 272 p. (in Russian).
19. Kirillov A.S., Agafonov V.R. Intelligent thermocouple input modules for thermionic experimental facility. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2016, no. 3, pp. 65-68 (in Russian).
20. The site of Agilent Technologies company. Available at: <http://www.agitech.ru/> (accessed Sep. 1, 2017) (in Russian).

Authors

Kirillov Andrey Sergeevich, PhD Student

E-mail: kir_obninsk@rambler.ru

Yarygin Valeriy Ivanovich, Chief Researcher, Professor, Dr. Sci (Engineering)

E-mail: ecs-yar@ippe.ru