

КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ СБОРОК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

М.Ю. Егоров^{1,2,3}, канд. техн. наук, доцент

С.И. Патлан¹, бакалавр

В.И. Перехожев⁴, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова

⁴АО «Институт реакторных материалов»

^{1,2,3}(Россия, г. Санкт-Петербург)

⁴(Россия, г. Заречный)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-7-1-188-191

Аннотация. Изучена возможность контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции электрогенерирующих элементов и сборок термоэмиссионных преобразователей. Разработаны эквивалентная электрическая модель и электрическая схема для контроля электрической изоляции во время испытаний на исследовательских ядерных реакторах. С помощью программы «multisim» проведена экспериментальная проверка способа измерений и расчетов на одно и многоэлементной сборках. Показано хорошее соответствие измеренных и расчетных значений токов утечки для одноэлементных электрогенерирующихборок и значительные отклонения при увеличении числа электрогенерирующих элементов в многоэлементных. Деградация изоляционных свойств коллекторного пакета, либо отдельно металлокерамического узла эмиттера не приводят к существенным потерям электрической мощности электрогенерирующей сборки, не превышая 0,2%.

Ключевые слова: термоэмиссионные преобразователи, одно и многоэлементные электрогенерирующие сборки, коллекторный пакет, металлокерамический узел, электрическое сопротивление изоляции, ток утечки, потери электрической мощности.

Термоэмиссионные преобразователи являются наиболее перспективными для систем автономного энергообеспечения повышенной мощности. Конструкция термоэмиссионного реактора преобразователя (ТРП) схожа с ядерным реактором, в котором вместо обычных твэлов применяют электрогенерирующие сборки [1-4]. Электроизоляционные характеристики изоляции электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) и электрогенерирующихборок (ЭГС), являются важными параметрами, определяющими работоспособность и выходную электрическую мощность космических ядерно-энергетических установок с термоэмиссионным преобразованием энергии. Важнейшим этапом создания, отработки режимов работы ЭГЭ и ЭГС и их последующего изготовления являются

экспериментальные исследования материалов и процессов, стендовые и реакторные испытания и исследования в составе специальных устройств. Основной задачей таких испытаний является изучение процессов и факторов, приводящих к изменению энергетических и ресурсных характеристик ЭГС, а также причин выхода из строя элементов и ЭГС в целом [5-7].

Используемые методы и способы контроля и диагностики одно и многоэлементных ЭГС при проведении реакторных испытаний и исследований в основном применяются для электрической изоляции коллекторных пакетов (КП) и не позволяют контролировать полные токи утечки и, следовательно, полные потери электрической мощности ЭГС [1,8]. На основании конструкционной схемы одноэлементной

ЭГС [1] была разработана электрическая модель и электрическая схема подключения шунтирующего сопротивления к испытываемой ЭГС для контроля электрической изоляции коллекторного пакета.

В процессе реакторных испытаний или эксплуатации происходит деградация изоляционных свойств ЭГС в целом или ее отдельных узлов. Результаты моделирова-

ния такой деградации, проводимых измерений, а также расчетов тока утечки и потери выходной мощности ЭГС при постепенной потере изоляционных свойств металлокерамических узлов (МКУ) эмиттера и общего электрического сопротивления коллектора приведены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблица 1. Результаты расчетов токов утечки и потери выходной мощности при деградации изоляционных свойств МКУ эмиттера

N	Характеристики ЭГС и их значения	$I_{ут.изм.}$, А	$I_{ш.}$, А	$R_{КП}$, Ом	$R_{МКУ}^3$, Ом	$R_{ЭГС(из.)}$, кОм	$I_{ут.рассч.}$, А	P, %
1	$U=1,5В, R_n=100Ом,$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	5000	10000	15	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,1
2	$I_n=0,15А, R_{МКУ}^3=10кОм,$ $R_{КП}=10кОм, R_{ш}=100Ом,$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	5000	5000	10	$0,15 \cdot 10^{-3}$	0,1
3	$R_{МКУ}^3$ уменьшается (10, 5, 1, 0,1)	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	5000	1000	6	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,2
4		$0,29 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	5000	107	5.1	$0,29 \cdot 10^{-3}$	0,2

Где: R_n – электрическое сопротивление нагрузки, Ом; $R_{МКУ}^3$ – электрическое сопротивление МКУ эмиттера (анода), Ом; $R_{МКУ}^k$ – электрическое сопротивление МКУ коллектора (катода), Ом; $R_{ш}$ – электрическое сопротивление шунта, Ом; $R_{КП}$ – электрическое сопротивление КП, Ом; I_n – элект-

рический ток нагрузки, А; $I_{МКУ}^3$ – электрический ток утечки через МКУ эмиттера, А; $I_{МКУ}^k$ – электрический ток утечки через МКУ коллектора, А; $I_{ш}$ – электрический ток через шунт, А; $I_{КП}$ – электрический ток утечки через КП, А; V – вольтметр, измеряющий выходное напряжение ЭГС – U , В.

Таблица 2. Результаты расчетов токов утечки и потери выходной мощности при деградации изоляционных свойств КП

N	Характеристики ЭГС и их значения	$I_{ут.изм.}$, А	$I_{ш.}$, А	$R_{КП,общ.}$, Ом	$R_{МКУ}^3$, Ом	$R_{ЭГС(из.)}$, кОм	$I_{ут.рассч.}$, А	P, %
1	$U=1,5В, R_n=100Ом,$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	5000	10000	15	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,06
2	$I_n=0,15А, R_{МКУ}^3=10кОм,$ $R_{МКУ}^3=10кОм,$	$0,112 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	3332	10000	13,332	$0,112 \cdot 10^{-3}$	0,07
3	$R_{ш}=100Ом, R_{КП}$ уменьшается (10, 5, 1,	$0,137 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	928	10000	10,928	$0,137 \cdot 10^{-3}$	0,09
4	0,1)	$0,148 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	97	10000	10,097	$0,148 \cdot 10^{-3}$	0,10

Результаты расчетов и измерений показали, что:

- рассчитанные и измеренные величины токов утечки для одноэлементной ЭГС совпадают;

- деградация изоляционных свойств КП либо отдельно МКУ эмиттера не приводят к существенным потерям электрической мощности ЭГС.

Измерения и расчеты токов утечки на многоэлементных ЭГС показали, что из-за перетоков электрического тока между отдельными электрогенерирующими элементами погрешность расчетов потери электрической мощности многоэлементной ЭГС увеличиваются с увеличением количества ЭГЭ и уменьшения электрического сопротивления коллектора каждого элемента.

Выводы.

Выполнен выбор и обоснование способа контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции для стабилизации генерируемой электрической мощности электрогенерирующих элементов и сборок.

Разработана эквивалентная электрической модель и электрическая схема для контроля электрической изоляции во время проведения реакторных испытаний.

С помощью программы «multisim» проведена экспериментальная проверка спо-

соба измерений и расчетов на одно и многоэлементной сборках. Показано хорошее соответствие измеряемых и расчетных значений токов утечки для одноэлементных ЭГС. Для многоэлементных ЭГС погрешность расчетов потери электрической мощности многоэлементной ЭГС увеличиваются с увеличением количества ЭГЭ и уменьшения электрического сопротивления коллекторного пакета каждого элемента.

Библиографический список

1. Синявский В. В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных сборок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 375 с.
2. Энциклопедия машиностроения. Машиностроение ядерной техники, т. IV-25, кн. 2. – М.: Машиностроение, 2005. – 121 с.
3. Птицын В.Э. Современное состояние и перспективы развития метода термоэмиссионного преобразования энергии // Научное приборостроение. – 2013. – Т. 23, № 4. – С. 25-39.
4. Ptitsin V.E. Research and development of the thermionic energy conversion method // 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). – Chicago, USA, 2013. Proc. IVNC. 2013. P. 341-345.
5. Корюкин В.А. Изменение свойств электродов термоэмиссионных одноэлементных ЭГК на начальном этапе работы // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, Вып. 1. – С. 48-57.
6. Агафонов В.Р., Ярыгин В.И. Ресурсные изменения характеристик термоэмиссионного преобразователя // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, Вып. 1. – С. 57-67.
7. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Методы расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, №2. – С. 135-139.
8. Патент 2127467С1 Российская Федерация, МПК H01J45/00. Способ определения электрической прочности коллекторной изоляции термоэмиссионной сборки при реакторных испытаниях // Синявский В.В. заявитель и патентообладатель Акционерное Общество Открытого Типа Корпорация им. С.П. Королева 97120137/09, заявлено 1997-12-05; опубликовано 1999-03-10.

CONTROL OF INSULATION CHARACTERISTICS OF POWER GENERATING ASSEMBLIES DURING REACTOR TESTS

M.Yu. Egorov^{1,2,3}, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

S.I. Patlan¹, *Bachelor*

V.I. Perekhozhev⁴, *Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher*

¹**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation**

²**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

³**Saint-Petersburg State Forest Technical University**

⁴**JSC Institute of Nuclear Materials**

^{1,2,3}**(Russia, Sankt-Petersburg)**

⁴**(Russia, Zarechniy)**

Abstract. *The study provides a justification and choice of a method for monitoring and diagnosing the electrical insulation characteristics of insulation to stabilize the generated electrical power of electric generating elements and assemblies of thermal emission converters. An equivalent electrical model and an electrical circuit for monitoring electrical insulation during tests at research nuclear reactors have been developed. With the help of the "multisim" program, an experimental verification of the method of measurements and calculations on single and multi-element assemblies was carried out. A good correspondence of the measured and calculated values of leakage currents for single-element power generating assemblies and significant deviations with an increase in the number of power generating elements in multi-element ones is shown. Degradation of the insulating properties of the collector package, or separately of the metal-ceramic emitter assembly, does not lead to significant losses of electrical power of the generating assembly, not exceeding 0.2%.*

Keywords: *thermal emission converters, single and multi-element power generating assemblies, collector package, metal-ceramic assembly, electrical insulation resistance, leakage current, electrical power loss.*