

Первичный преобразователь для измерений плотности потока заряженных частиц

С. Г. ТРОФИМЧУК, И. И. ЦВЕТКОВ, А. В. ОБОРИН, А. Ю. ВИЛЛЕВАЛЬДЕ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: tsg@vniim.ru

Приведена конструкция и основные метрологические характеристики первичного преобразователя типа цилиндра Фарадея для измерений плотности потока электронов с максимальной энергией до 20 МэВ и протонов с максимальной энергией до 100 МэВ в диапазоне $1 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹ при передаче единиц величин средствами измерений из состава комплексов гелиогеофизической аппаратуры.

Ключевые слова: цилиндр Фарадея, ускоритель заряженных частиц, электрон, протон, плотность потока заряженных частиц, комплекс гелиогеофизической аппаратуры.

Design and main metrological characteristics of Faraday cup for measurements of flux density rate of electrons with maximum energy up to 20 MeV and protons with maximum energy up to 100 MeV in the range from $1 \cdot 10^5$ to $1 \cdot 10^{10}$ cm⁻²·s⁻¹ are considered.

Key words: Faraday cup, charged particles accelerator, electron, proton, the flux density of charged particles, geophysical equipment.

Дистанционное зондирование Земли и гидрометеорологические наблюдения проводятся с применением космических аппаратов орбитальной группировки, оснащённых гелиогеофизическими аппаратными комплексами (ГГАК) для измерений различных параметров, включая плотность потока заряженных частиц (электронов, протонов). В соответствии с приказом Минприроды России от 7 декабря 2012 г. № 424 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений» измерения плотностей потоков электронов и протонов отнесены к сфере государственного регулирования. При этом измерения плотностей потоков протонов и электронов с энергиями соответственно от 0,1 кэВ до 600 МэВ и от 0,1 кэВ до 10 МэВ в диапазоне 10 — $1 \cdot 10^9$ см⁻²·с⁻¹ следует выполнять с погрешностью не более 25 %.

Метрологические характеристики средств измерений (СИ) плотностей потоков электронов и протонов определяют в калиброванных полях ускорителей заряженных частиц. Государственный первичный эталон единиц потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучений ГЭТ 72—01 обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единиц указанных величин [1]. Эталонные первичные преобразователи из состава ГЭТ 72—01 позволяют калибровать поля ускорителей по плотности потока электронов и могут быть использованы для передачи единицы плотности потока электронов соответствующим СИ, в том числе входящим в ГГАК. В то же время в составе ГЭТ 72—01 отсутствуют эталонные первичные преобразователи для калибровки полей излучения протонных ускорителей по плотности потока протонов, поэтому СИ этих величин, содержащиеся в ГГАК, не проходят калибровку. Для них актуально

обеспечение прослеживаемости к ГЭТ 72—01.

С целью решения поставленной задачи во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в рамках ведомственной целевой программы «Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, разработки государственных (в том числе первичных) эталонов единиц величин» был разработан новый эталонный первичный преобразователь, который может служить для передачи единиц плотности потоков электронов и протонов от ГЭТ 72—01 соответствующим СИ из состава ГГАК.

Наиболее часто в качестве абсолютного метода измерений плотности потока заряженных частиц применяется зарядовый метод. Этот метод обычно реализуется с помощью первичных измерительных преобразователей типа цилиндра Фарадея (ЦФ). Принцип действия ЦФ основан на взаимодействии ускоренных заряженных частиц с его поглотителем и измерении образованного при этом электрического заряда. Зная заряд электрона (протона), по значению измеренного заряда в поглотителе можно судить о плотности потока заряженных частиц. На результат измерений плотности потока оказывают влияние различные факторы: отражение от поглотителя заряженных частиц и прохождение их сквозь него; токи утечки, зависящие от конструкции ЦФ; добавочный ток, обусловленный проникновением заряженных частиц в поглотитель через корпус ЦФ.

Конструкция ЦФ определяется параметрами поля заряженных частиц, а также требованиями радиационной безопасности в месте проведения измерений. Поэтому при измерениях в полях ускорителей заряженных частиц с заданными характеристиками необходимо либо разработать новую конструкцию ЦФ, либо проанализировать возможности использования имеющихся конструкций. Современные компьютерные программы для расчёта взаимодействия заряженных частиц с веществом позволяют существенно облегчить эти задачи [2, 3].

Первичный измерительный преобразователь типа ЦФ, разработанный во ВНИИМ, предназначен для измерений

плотностей потоков электронов и протонов с энергиями соответственно 1—20 МэВ и 5—100 МэВ в диапазоне $1 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹. Одним из основных требований была универсальность устройства. При разработке конструкции ЦФ учтён опыт применения первичных измерительных преобразователей плотности потока электронов из состава ГЭТ 72—01.

Особенности взаимодействия электронного и протонного излучения с веществом определяют выбор материалов и толщины поглотителя и внешнего корпуса, а также геометрию входного коллиматора и поглотителя. Исходя из заданных параметров электронных и протонных пучков сформулированы следующие требования к материалу поглотителя: высокие электропроводность, радиационная стойкость, коэффициент теплопроводности для отвода выделяемой в поглотителе мощности и низкий уровень наведённой радиоактивности после облучения протонами для обеспечения радиационной безопасности. В качестве материала поглотителя, внешнего корпуса и коллиматоров ЦФ был выбран алюминий марки А95 с удельной электропроводностью 35,5 мкСм/м и теплопроводностью 204 Вт/(м·К). Согласно проведённым расчётам для электронов и протонов при указанных выше энергиях и плотности потока частиц применение алюминия позволяет добиться геометрической устойчивости конструкции при нагреве из-за поглощения энергии излучения, а также приводит к быстрому спаду наведённой активности после облучения протонами в заданном диапазоне.

По результатам анализа литературных источников [4—6] была выбрана конструкция преобразователя типа ЦФ, представленная на рис. 1. Внешний корпус 1 служит для экранирования поглотителя 2 от рассеянного излучения. Коллиматор 3 представляет конструкцию из трёх сопрягаемых частей. В зависимости от максимальной энергии заряженных частиц измерения выполняют с одной или несколькими частями коллиматора. Для минимизации токов утечки поглотитель 2 закрепляют в корпусе с помощью изоляторов из полированного кварцевого стекла. Основные геометрические параметры ЦФ были выбраны с учётом процессов взаимодействия с ним пучков электронов и протонов. Значения ионизационных потерь заряженных частиц, их пробега, рассеивания и отражения в заданной геометрии приведены в [7—9]. В дальнейшем конструкцию ЦФ уточняли при моделировании процессов взаимодействия излучения с веществом методом Монте-Карло по программам MCC 3D [2] и SRIM-2012 [3]. Исходными данными для расчётов служили определённые ранее геометрические параметры ЦФ, а также характеристики его конструктивных материалов. В результате вычислений получены следующие размеры ЦФ: толщина и диаметр поглотителя — соответственно 40 и 62 мм; толщина и диаметр коллиматора — соответственно 32 и 11,3 мм; глубина входного канала 35 мм.

При моделировании параллельный пучок заряженных частиц диаметром 10 мм направлялся в поглотитель без касания стенок входного канала; количество частиц (электронов или протонов) в потоке, равное 10^8 , принимали одинаковым для всех вычислений. Моделирование проводили для моноэнергетических пучков электронов и протонов в заданных диапазонах энергий. Для подсчёта электронов и протонов, покинувших поглотитель вследствие различных

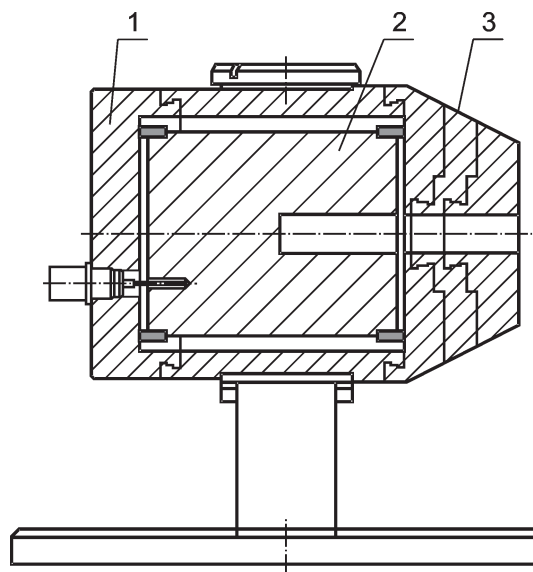


Рис. 1. Конструкция преобразователя типа цилиндра Фарадея: 1 — внешний корпус; 2 — поглотитель; 3 — набор съёмных коллиматоров

физических процессов, использовали модель «идеального детектора», который фиксировал попавшее на него излучение и пропускал его без изменений энергии и угла.

Плотность потока заряженных частиц с использованием преобразователя типа ЦФ определяют согласно уравнению измерений

$$\varphi = \frac{\Delta Q - \Delta Q_{\text{пр}}}{S \Delta t q_e} k_{\text{пр}} k_{\text{отр}} k_{\text{кол}} k_{\text{рас}} k_{\text{осл}}, \quad (1)$$

где ΔQ — измеренный заряд в поглотителе при воздействии потока заряженных частиц за интервал времени Δt ; $\Delta Q_{\text{пр}}$ — измеренный заряд в случае потока заряженных частиц, прошедших через стенки корпуса, и за счёт токов утечки ЦФ за интервал времени Δt ; q_e — заряд электрона (протона); S — площадь поперечного сечения входного канала преобразователя ЦФ; k — поправочные коэффициенты.

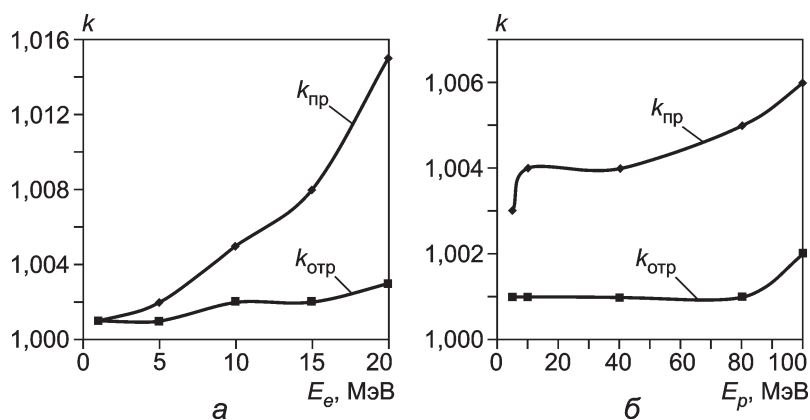


Рис. 2. Зависимости поправочных коэффициентов $k_{\text{пр}}$, $k_{\text{отр}}$, учитывающих проницаемость поглотителя для заряженных частиц с энергией в заданном диапазоне и их отражение и утечку из входного канала поглотителя, от энергии электронов (а) и протонов (б)

Таблица 1

Расчётные значения поправочных коэффициентов уравнения измерений (1) для протонов и электронов с различными энергиями

Заряженные частицы	Энергия, МэВ	$k_{пр}$	$k_{отр}$	$k_{кол}$	$k_{рас}$	$k_{осл}$
Протоны	5	1,003	1,001	0,998	1,001	1,007
	10	1,004	1,001	0,996	1,003	1,006
	40	1,004	1,001	0,996	1,004	1,006
	80	1,005	1,001	0,995	1,005	1,004
	100	1,006	1,002	0,994	1,007	1,003
Электроны	1	1,001	1,001	0,999	1,002	1,003
	5	1,002	1,001	0,998	1,003	1,002
	10	1,005	1,002	0,995	1,004	1,002
	15	1,008	1,002	0,992	1,006	1,001
	20	1,015	1,003	0,985	1,010	1,001

В (1) входят пять поправочных коэффициентов:

$k_{пр} = 1 + N_{пр}/N$ учитывает проникновение излучения через поглотитель, или его проницаемость (N — количество заряженных частиц, проникающих в ЦФ; $N_{пр}$ — количество заряженных частиц, зарегистрированных за пределами поглотителя);

$k_{отр} = 1 + N_{отр}/N$ характеризует процессы отражения от поглотителя и выхода заряженных частиц из входного канала поглотителя ($N_{отр}$ — количество заряженных частиц, отраженных от поглотителя и вышедших из его входного канала);

$k_{кол} = 1 - N_{кол}/N$ учитывает проникновение излучения в нормальном направлении через стенки коллиматора ($N_{кол}$ — количество заряженных частиц, прошедших через стенки коллиматора и достигших поглотителя);

$k_{рас} = 1 + N_{рас}/N$ описывает рассеяние заряженных частиц в канале коллиматора ($N_{рас}$ — количество заряженных частиц, рассеянных в канале коллиматора и не достигших поглотителя);

$k_{осл} = 1 + N_{осл}/N$ характеризует ослабление потока заряженных частиц в воздухе на расстоянии, ограниченном передними поверхностями коллиматора и поглотителя ($N_{осл}$ — количество заряженных частиц, ослабленных в воздухе на указанном расстоянии и не достигших поглотителя).

При измерении заряда $\Delta Q_{пр}$ на переднюю стенку преобразователя устанавливали заглушку. Поправочные коэффициенты вычисляли по результатам моделирования взаимодействия пучков электронов и протонов заданных энергий с преобразователем типа ЦФ методом Монте—Карло. Зависимости поправочных коэффициентов $k_{пр}$ и $k_{отр}$ от энергии

электронов и протонов представлены на рис. 2. Расчётные значения всех поправочных коэффициентов для различных энергий заряженных частиц приведены в табл. 1. Из полученных результатов следует, что предложенная конструкция ЦФ позволяет минимизировать потери заряда, обусловленные утечкой отражённых заряженных частиц из входного канала преобразователя ЦФ, и отказаться от использования магнитных или электростатических улавливающих устройств.

С учётом уравнения измерений (1) составлен и проанализирован бюджет неопределённостей измерений плотности потока заряженных частиц с помощью преобразователя типа ЦФ. Оценивали неопределённости согласно стандарту [10]. Результаты представлены в табл. 2. Неопределённости поправочных коэффициентов вычислены с применением метода Монте—Карло в программах MCC 3D и SRIM-2012.

Суммарная и расширенная неопределённости составили $u_c = 0,93$; $U = 1,9$ ($k = 2$).

Первичный измерительный преобразователь типа ЦФ позволяет измерять плотности потоков электронов и протонов с максимальными энергиями до 20 МэВ и 100 МэВ, соответственно, в диапазоне $1 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹ с расширенной неопределённостью не более 2 %. После проведения исследований в реальных полях протонного излучения данный преобразователь может быть включён в состав ГЭТ 72—01. Это позволит расширить область применения эталона для калибровки полей излучения протонных ускорителей и обеспечит прослеживаемость СИ плотности потока протонов из состава ГГК к ГЭТ 72—01.

Литература

1. **Федеральный** информационный фонд по обеспечению единства измерений. Сведения о государственном первичном эталоне единиц потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучений с энергией до 50 МэВ ГЭТ 72—01 [Электрон. ресурс] <http://www.foundmetrology.ru> (дата обращения: 20.09.2016).

2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615088 от 22.10.2008 г. «Программа для имитационного трёхмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений MCC 3D» / С. С. Козловский, К. А. Багаев, А. В. Деч.

3. **Ziegler J. F., Biersack J. P.** SRIM — The Stopping and Range of Ions of Matter [Электрон. ресурс] <http://www.srim.org/SRIM/SRIMINTRO.htm> (дата обращения: 20.09.2016).

4. **Harasimowicz J.** Development of Instrumentation for Low Energy Beams. Doctoral thesis. University of Liverpool, 2013.

5. **Suwada T., Ohsawa S., Furukawa K., Akasaka N.** Absolute Beam-Charge Measurement for Single-Bunch Electron Beams. // J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 628—634.

6. **McChesney P.** Faraday Cup Design and Geant4 Simulation for the ALPHA Project at IUCF. Bachelor thesis. Indiana University, 2009.

Таблица 2

Бюджет неопределённостей входных величин уравнения измерений (1)

Неопределённости по типам А, В	ΔQ	$\Delta Q_{пр}$	t	q_e	S	$k_{пр}$	$k_{отр}$	$k_{кол}$	$k_{рас}$	$k_{осл}$
$u_A \cdot 10^2$	0,1	0,03	0,01	—	—	—	—	—	—	—
$u_B \cdot 10^2$	0,2	0,05	0,01	$1 \cdot 10^{-8}$	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

7. **Berger M. J., Coursey J. S., Zucker M. A., Chang J.** Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions [Электрон. ресурс] <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm> (дата обращения: 20.09.2016).

8. **Pages I., Bertel E., Joffre H., Sklavenitis L.** Atomic Data. Energy loss, Range and Bremsstrahlung yield for 10 keV to 100 MeV. N.Y., London: Academic Press, 1972.

9. **ICRU Report 37** (1984), Stopping Powers for Electrons and Positrons, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, USA.

10. **ГОСТ Р 54500.3—2011.** Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.

Дата принятия: 02.11.2016.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317

Алгоритм мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электростанций

В. М. ГЕВОРКЯН, К. В. КРАЮШКИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: gvm@emc.mpei.ac.ru

Представлен алгоритм мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электростанций. Предложен принцип построения системы мониторинга, и оценена достоверность контроля состояния измерительного трансформатора напряжения.

Ключевые слова: измерительный трансформатор напряжения, система мониторинга, электростанция, короткое замыкание, аварийная ситуация.

The article depicts the algorithm of monitoring of voltage transformers insulation (during normal functioning) in the voltage generation circuits on power plants by indirect signs of insulation state. Was suggested a principle of such monitoring device and was evaluated it's reliability (accuracy assessment of the insulation state).

Key words: voltage transformer, monitoring system, power plant, short circuit, power plant failure.

Актуальность задачи мониторинга в режиме реального времени состояния изоляции высоковольтной обмотки измерительных трансформаторов напряжения (ТН) в цепи генераторного напряжения электростанций определяется серьезными последствиями как экономического, так и социального характера, которые может вызвать отказ в работе измерительных трансформаторов. Опасные нарушения штатного функционирования ТН связаны в основном с коротким замыканием (КЗ) высоковольтной обмотки, что может привести к отключению турбогенератора станции и соответственно недопоставке электроэнергии или к аварии на турбогенераторе и экономическим потерям [1].

В цепи генераторного напряжения электростанций применяют однофазные трансформаторы с заземлённой нейтралью типа ЗНОЛ или ЗНОМ (З — заземляемый трансформатор; Н — трансформатор напряжения; О — однофазный трансформатор; Л — трансформатор с литой изоляцией; М — трансформатор с масляной изоляцией). В последние десятилетия предпочтение отдают ТН типа ЗНОЛ, литая изоляция которых подвержена процессам временной деградации с последующим КЗ витков высоковольтной обмотки [2]. Ис-

пользуемые для контроля изоляции ТН приёмы непригодны для оперативного мониторинга состояния изоляции и неудобны для периодического применения [3].

В последние годы для предотвращения последствий КЗ в первичной обмотке ТН некоторых типов ЗНОЛ предусмотрен предохранитель. Его штатное срабатывание отключает ТН. Тем не менее, возникновение КЗ носит случайный, непредсказуемый для персонала электростанций, характер. Кроме того, в ряде случаев, например, на атомных станциях, применение ТН с предохранителем не предусмотрено техническими условиями из-за существенного изменения конструкций токопроводов цепи генераторного напряжения.

Особенностью цепи генераторного напряжения электростанции является возможность компактного подключения к каждому фазному проводу до 12 однотипных ТН, что позволяет построить принципиально простую систему оперативного контроля за состоянием изоляции ТН. Алгоритм мониторинга, основанный на использовании этой особенности, заключается в измерениях в режиме реального времени одинаковых параметров (например, тока в первичной высоковольтной обмотке или напряжения во вторичной низко-