

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. В. Штабель*, Л. А. Самотик, Е. А. Мизрах

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: shtabnik@gmail.com

Одной из особенностей современных систем электропитания космического аппарата является связь силовой шины «минус» с корпусом, это делается в целях защиты от статического заряда, накапливаемого на корпусе, который может привести к появлению высокой разности потенциалов между токоведущими частями системы электропитания и корпусом, что приводит к ухудшению помеховой обстановки, а также к возможному электрическому пробое изоляции токоведущих элементов системы электропитания. Недостатком этого решения является возникающая опасность замыкания плюсовых шин системы электропитания на корпус, что, в свою очередь, может привести к короткому замыканию и выходу из строя составных частей системы электропитания и кабельной сети. С целью исключения аварийных ситуаций в ходе испытаний и эксплуатации космического аппарата авторами разрабатывается устройство непрерывного контроля сопротивления изоляции, основанное на бесконтактном измерении токов утечки на каждой линии системы электропитания. При этом величина измеряемых дифференциальных токов весьма мала и может составлять десятки микроампер. Применяемые в настоящее время датчики малых токов имеют недостатки, проявляющиеся в значительном влиянии магнитных полей от силовых токов, которые приводят к увеличению погрешности датчика и, следовательно, к повышению погрешности контроля сопротивления изоляции. Авторами были исследованы датчики тока, предложен метод компенсации изученных погрешностей измерения с применением дополнительного датчика тока, разработано и исследовано устройство, использующее предложенный принцип, и проведено экспериментальное исследование опытного образца устройства. Разработанное устройство внедрено на рабочем месте лабораторно-отрабочных испытаний космического аппарата, в настоящее время проводятся дополнительные исследования и отработка новых методов, повышающих качество и точность контроля сопротивления изоляции.

Ключевые слова: испытания, система электропитания, космический аппарат, сопротивление изоляции, токи утечки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 628–632

IMPROVEMENT OF INSULATION RESISTANCE MEASUREMENT ACCURACY DURING SPACECRAFT POWER SYSTEM TESTS

N. V. Shtabel*, L. A. Samotik, E. A. Mizrah

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: shtabnik@gmail.com

Modern spacecraft power systems features connection of ground power bus with satellite body, which aims to improve noise immunity and protect power system and its modules from possible breakdown due to static charge accumulation on spacecraft body, which can lead to high voltages between spacecraft body and power system sensitive electronic components. The main disadvantage of this solution is a possibility of short circuit between any high voltage power system bus and spacecraft body, which can easily lead to breakdown of power system modules, payload elements and wire harness, making satellite dysfunctional. To prevent such malfunction situations during terrestrial testing and spacecraft lifetime the authors developed automatic insulation resistance continuous monitoring device based on contactless leakage current measurements on every spacecraft power system line. In the device magnitude of measured differential currents can be very low, in order of microamperes. Modern magnetic modulation based leakage current sensors has a major flaw which leads to great influence of high current magnetic field on a measurement result and highly increased insulation resistance measurement error. The authors has studied magnetic modulation based leakage current sensors, proposed the method of error compensation for studied measurement errors using additional current sensor, developed and tested device using proposed principles and done experimental study of device development version. Developed automatic insulation resistance continuous monitoring device implemented on the laboratory

spacecraft power system test bench, at present the authors are preparing additional experiments to improve methodology, quality, accuracy and convenience of recently introduced insulation resistance measurement methods.

Keywords: testing, power system, spacecraft, insulation resistance, leakage currents.

Введение. Одной из особенностей системы электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) является связь силовой токоведущей шины (обычно шины «минус») с корпусом. В ходе испытаний электрооборудования КА возможно нарушение целостности изоляции шин и замыкание их на корпус. При этом напряжение на силовых шинах может достигать 200 В, величина токов при коротком замыкании может составлять до 100–150 А. Это может угрожать жизни и здоровью персонала, а также привести к аварийной ситуации и повреждению дорогостоящего оборудования, поэтому обнаружение токов утечки и контроль целостности изоляции необходимы для обеспечения безопасности персонала и предотвращения повреждения оборудования КА и испытательного оборудования [1].

В настоящее время при испытаниях энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) КА широко применяется контроль сопротивления изоляции, проводимый до начала испытаний с помощью внешних источников контрольного тока, например мегаомметром [2]. Однако такой метод имеет ограниченное применение, так как при наличии в системе электропитания ключей для коммутации источников питания и нагрузок такой метод позволяет лишь оценить сопротивление изоляции соединительных проводов и не охватывает возможные утечки в полезной нагрузке и первичных источниках питания.

Существуют методы контроля сопротивления изоляции, основанные на измерении напряжения между плюсовыми шинами системы и корпусом, однако их область применения также ограничена,

поскольку в этом случае определяется только эквивалентное сопротивление изоляции всех линий относительно корпуса, но отсутствует информация о сопротивлении изоляции каждой линии, следовательно, локализовать аварийную линию затруднительно [3–6]. Также этот класс методов не позволяет получить информацию о сопротивлении между шиной «минус» и корпусом.

Предлагаемый метод контроля сопротивления изоляции основан на бесконтактном измерении токов утечки с помощью датчиков постоянного тока на основе магнитной модуляции [7; 8]. В основу метода положен принцип измерения дифференциальных токов каждой из шин питания, появляющихся при снижении сопротивления изоляции [9]. На каждую из контролируемых шин питания устанавливается датчик, через магнитопровод которого продеваются плюсовая и минусовая шины так, что датчик измеряет разность токов, протекающих в нагрузку из источника и обратно. В случае возникновения электрической связи между плюсовой шиной и корпусом через сопротивление изоляции $R_{ут}$, ток утечки будет протекать в источник через корпус, следовательно, ток, протекающий из нагрузки в источник, окажется меньше – датчик покажет разность токов. Зная величину тока утечки и напряжения линии, можно вычислить сопротивление утечки $R_{ут}$ [10].

Структура предлагаемого устройства. Структура рабочего места испытаний ЭПА с устройством контроля сопротивления изоляции на основе предлагаемого метода показана на рис. 1.

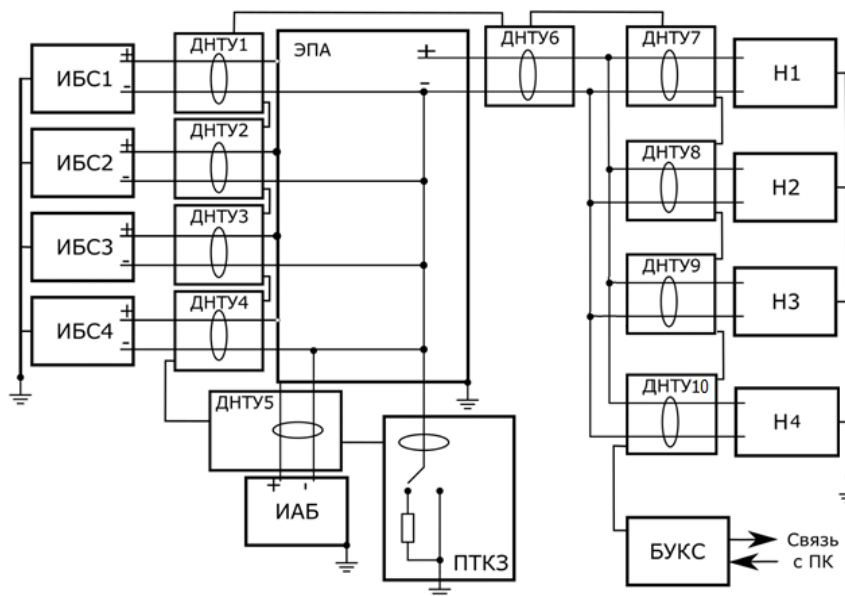


Рис. 1. Структура рабочего места испытаний ЭПА с устройством контроля сопротивления изоляции

Fig. 1 Structure of spacecraft energy conversion equipment test bench with automatic insulation resistance continuous monitoring device

В составе рабочего места используются ИБС1–ИБС4 – имитаторы солнечной батареи, ИАБ – имитатор аккумуляторной батареи, Н1–Н4 – нагрузки, ЭПА – испытываемая энергопреобразующая аппаратура.

Устройство контроля сопротивления изоляции состоит из следующих модулей: ДНТУ1–ДНТУ10 – датчики напряжения линий и токов утечки; ПТКЗ – прерыватель тока короткого замыкания; БУКС – блок управления, контроля и сигнализации.

Предлагаемый метод позволяет непрерывно контролировать сопротивление изоляции плюсовых шин в имитаторах первичных источников электроэнергии (ИПИЭ) ИБС1–ИБС4, ИАБ и нагрузках Н1–Н4 в процессе испытаний, а также соединительных кабелей на участках от модулей ИПИЭ до ДНТУ и от нагрузки до ДНТУ. Контроль производится на основании показаний датчиков напряжения и токов утечки, расположенных на каждой из линий питания. При этом измеряются напряжения и токи утечки на каждой линии, затем они передаются в блок управления, контроля и сигнализации, где производится расчет сопротивления изоляции каждой из линий. Информация о сопротивлении изоляции каждой линии позволяет уменьшить время поиска участка сети со сниженным сопротивлением изоляции, что уменьшает общую вероятность возникновения аварийной ситуации, что особенно актуально для систем большой мощности [11].

Метод повышения точности. Особенностью предлагаемого метода является блок ПТКЗ, устанавливаемый в месте связи шины «минус» с корпусом и выполняющий три функции:

- обеспечение работы СЭП в процессе испытания в следующих режимах: шина «минус» связана с корпусом и шина «минус» отключена от корпуса;
- измерение токов, протекающих из корпуса на шину «минус»;
- размыкание связи шины «минус» с корпусом при коротком замыкании плюсовой шины на корпус для защиты оборудования от протекания больших токов [12].

Введение в схему контроля сопротивления изоляции датчика тока, расположенного в ПТКЗ и рассчитанного на измерение малых токов (до 100 мА), позволяет дополнить информацию, получаемую с датчиков напряжения и токов утечки.

Так как все токи утечки с плюсовых шин протекают по контуру шина «плюс» – корпус – шина «минус», то датчик тока, расположенный в единственном месте соединения минусовой шины и корпуса, покажет их суммарную величину.

Таким образом, основываясь на показаниях датчика тока ПТКЗ и ДНТУ, можно сделать вывод не только об утечках со стороны источников и нагрузок, как отмечалось выше, но и о сопротивлении изоляции в ЭПА и соединительных кабелях от ЭПА до ИПИЭ.

Получить точную информацию о месте возникновения утечки в этом случае невозможно, однако можно оценить сопротивление изоляции, основываясь на известных напряжениях всех линий.

Результаты испытаний. Авторами был разработан, изготовлен и внедрен в эксплуатацию на рабочем месте лабораторно-отрабочных испытаний СЭП (ЛОИ СЭП) опытный образец устройства контроля сопротивления изоляции.

Для создания опытного образца были заданы следующие технические характеристики:

- количество одновременно контролируемых линий: 10;
- диапазон измеряемых токов утечки: от 0,02 до 100 мА;
- максимальное значение напряжения линии: 210 В;
- максимальный рабочий ток линии: 150 А;
- диапазон определения сопротивления изоляции: от 1 до 1000 кОм;
- погрешность определения сопротивления изоляции: не более 20 %;
- время защиты при коротком замыкании: не более 25 мкс [13].

Для оценки погрешности контроля сопротивления изоляции использовалась схема, представленная на рис. 2. Для имитации ИПИЭ используется лабораторный блок питания, для имитации нагрузки – резистивный блок нагрузок. Коробка соединительная имитирует ЭПА. В схеме использованы два ДНТУ, что позволяет проверить все возможные случаи возникновения утечек: со стороны ИП, со стороны нагрузки, а также в ЭПА.

В ходе испытаний имитировалось ухудшение сопротивления изоляции между точками +ИП, +Н, +КС и корпусом с помощью резисторов номинала 1, 240, 1000 кОм. При этом мультиметром контролировались фактический ток утечки, напряжение линии и показания устройства контроля изоляции, после чего производился расчет относительной погрешности измерения сопротивления изоляции.

Оценка погрешности контроля сопротивления изоляции производилась для четырех напряжений: 20, 60, 100, 120 В, при этом СЭП работала в режиме «минус» соединен с корпусом». Результаты исследования приведены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что с увеличением напряжения линии погрешность уменьшается. Это объясняется большими величинами тока утечки и, следовательно, меньшим влиянием погрешности измерения датчика тока утечки на результат измерений.

Заключение. В ходе выполнения работы был разработан метод повышения точности контроля сопротивления изоляции, на основе метода было разработано устройство, уменьшающее погрешность контроля сопротивления изоляции с 30 % [14] до менее чем 20 %, как показали испытания. Разработанное устройство внедрено на рабочем месте ЛОИ СЭП КА в АО «ИСС» [15]. Дальнейшими направлениями исследований являются разработка улучшенных датчиков тока с меньшей погрешностью измерения и применение интеллектуальных алгоритмов фильтрации измерений для автоматизации оповещения оператора об изменениях сопротивления изоляции.

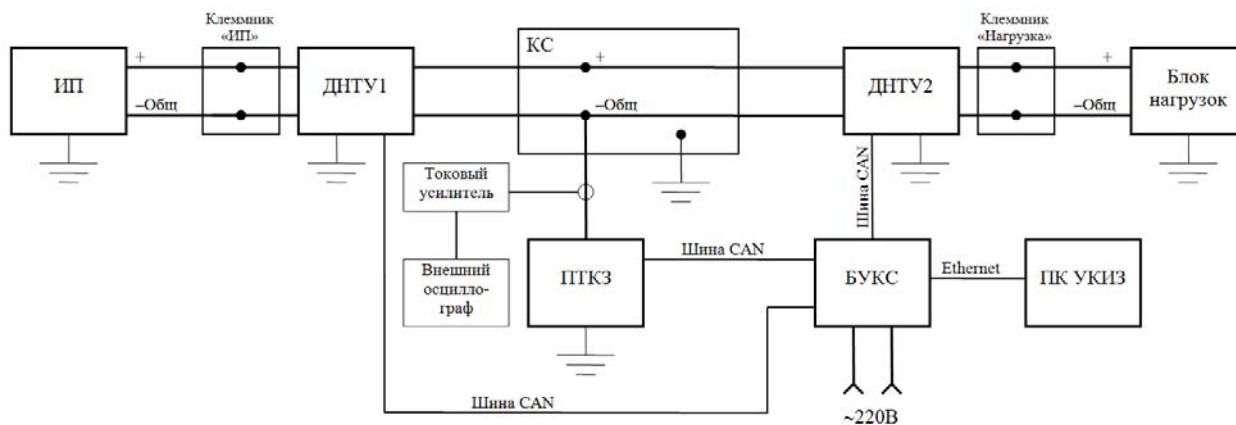


Рис. 2. Схема исследования погрешности контроля сопротивления изоляции

Fig. 2. Experiment scheme for studying insulation resistance monitoring device measurement error

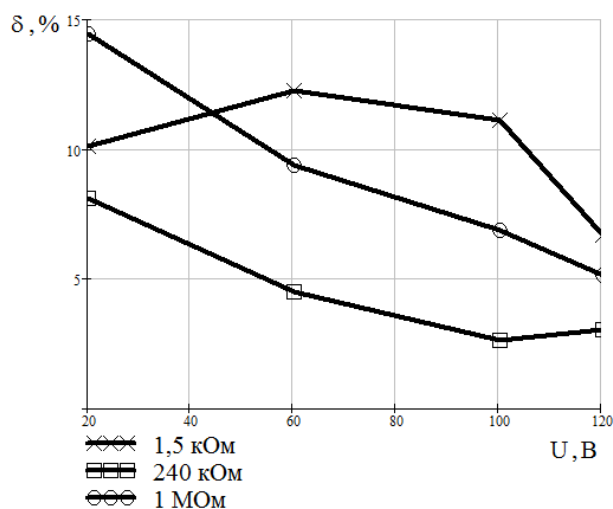


Рис. 3. Зависимость погрешности контроля сопротивления изоляции от напряжения линии: δ – усредненная погрешность для сопротивлений 1,5 кОм, 240 кОм, 1 МОм

Fig. 3. Insulation resistance measurement error experimental dependency from line voltage δ – averaged error for insulation resistance of 1,5 k Ω , 240 k Ω , 1 M Ω

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0082, уникальный идентификатор RFMEFI57714X008) и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Government Contract 14.577.21.0082, unique identifier RFMEFI57714X008) and JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Библиографические ссылки

1. Федосов В. В. Надежность систем автоматического управления / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 83–85.
2. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. 2002. № 1 (13). С. 22.
3. Пат. 2391679 Российская Федерация, МПК 51 G 01 R 31/02. Способ автоматического контроля

сопротивления изоляции шин источников постоянного тока на корпус / ОАО «ИСС» (RU). № 2009103681/28 ; заявл. 04.02.2009 ; опубл. 10.06.2010.

4. Пат. 2351940 Российская Федерация, МПК 51 G 01 R 31/02. Способ автоматического контроля сопротивления изоляции шин источников постоянного тока на корпус / ОАО «ИСС» (RU). № 2006132155/28 ; заявл. 06.09.2006 ; опубл. 20.03.2008.

5. Пат. 561149 СССР, МПК G 01 R 27/18. Устройство для контроля сопротивления изоляции сетей постоянного тока / Андрущенко А. Г., Фомин Н. Ф., Журавель Е. В. (RU). № 2339999/21 ; заявл. 02.04.1976 ; опубл. 5.06.1977.

6. Пат. 2072602 Российская Федерация, МПК H 02 N 3/16, H 02 N 5/10. Устройство защитного отключения электроприбора / Филиппов Н. И., Плиев К. В., Филиппова О. Т. № 94027952/07 ; заявл. 25.07.1994 ; опубл. 27.01.1997.

7. Cheng C. F., Li R. S., Chen J. R. Design of the DC leakage current sensor with magnetic modulation-based scheme // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Taipei, Taiwan, 2013. P. 1–6.

8. Ponjavic M. M., Duric R. M. Nonlinear Modeling of the Self-Oscillating Fluxgate Current Sensor // *IEEE Sensors Journal*. 2007. Vol. 7, № 11 P. 1546–1553.

9. Pejovic P. A simple circuit for direct current measurement using a transformer // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1998. Vol. 45, № 8. P. 830–837.

10. Штабель Н. В., Мизрах Е. А., Ушаков А. В. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции для системы электропитания космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XX юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 466–468.

11. Yang J., Fletcher J. E., O'Reilly J. Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59, № 10. P. 3827–3837.

12. Фоос Р. Л., Штабель Н. В. Экспериментальное исследование макета прерывателя тока короткого замыкания для сетей постоянного тока // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс]. URL: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (дата обращения: 01.09.2017).

13. Штабель Н. В., Неведьев И. О. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции цепей системы электропитания космического аппарата // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : URL: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (дата обращения: 01.09.2017).

14. ГОСТ Р МЭК 61557-2–2005. Сети электрические распределительные низковольтные напряжением до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока. Электробезопасность. Аппаратура для испытания, измерения или контроля средств защиты. Ч. 2. Сопротивление изоляции. М. : Стандартинформ, 2006. 4 с.

15. Штабель Н. В., Киселев П. А., Мизрах Е. А. Устройство для непрерывного контроля сопротивления изоляции в процессе испытаний системы электропитания космического аппарата // Сб. тезисов науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС» (22–25 августа 2017, г. Железногорск) [Электронный ресурс]. URL: <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

References

1. Fedosov V. V. *Nadezhnost' sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control systems reliability]. 2015, Krasnoyarsk, SibGAU Publ., P. 83–85 (In Russ.).

2. Ivanov E., D'yachkov A. [Correct way to measure insulation resistance]. *Novosti elektrotekhniki*. 2002, No. 1 (13), P. 22 (In Russ.).

3. JSC “ISS”. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii shin istochnikov postoyannogo toka na korpus*. [Automatic power supply bus insulation resistance measurement method]. Patent RF, no. 2391679, 2010.

4. JSC “ISS”. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii shin istochnikov postoyannogo toka na korpus*. [Automatic power supply bus insulation

resistance measurement method]. Patent RF, no. 2351940, 2008.

5. Andrushchenko A. G., Fomin N. F., Zhuravel' E. V. *Ustroystvo dlya kontrolya soprotivleniya izolyatsii setey postoyannogo toka* [Device for monitoring insulation resistance of DC networks]. Patent USSR, no. 561149, 1977.

6. Filippov N. I., Pliev K. V., Filippova O. T. *Ustroystvo zashchitnogo otklyucheniya elektropribora* [Electrical appliance ground fault protection device]. Patent RF, no. 2072602, 1997.

7. Cheng C. F., Li R. S., Chen J. R. Design of the DC leakage current sensor with magnetic modulation-based scheme. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Taipei, Taiwan, 2013, P. 1–6.

8. Ponjavic M. M., Duric R. M. Nonlinear Modeling of the Self-Oscillating Fluxgate Current Sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2007, Vol. 7, No. 11, P. 1546–1553.

9. Pejovic P. A simple circuit for direct current measurement using a transformer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1998, Vol. 45, No. 8, P. 830–837.

10. Shtabel' N. V., Mizrakh E. A., Ushakov A. V. [Spacecraft power supply system leakage current detection and insulation resistance measurement system]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Yubileynoy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva* (09–12 noyab.2016, g. Krasnoyarsk), 2016, Vol. 2, P. 466–467 (In Russ.).

11. Yang J., Fletcher J. E., O'Reilly J. Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012, Vol. 59, No. 10, P. 3827–3837.

12. Foos R. L., Shtabel N. V. *Eksperimental'noe issledovanie maketa preryvatel'ya toka korotkogo zamykaniya dlya setey postoyannogo toka* [Experimental study of short circuit breaker for DC networks]. Available at: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (accessed 01.09.2017).

13. Shtabel N. V., Nefedev I. O. *Sistema kontrolya tokov utechki i soprotivleniya izolyatsii tsepey sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Spacecraft power supply system leakage current and insulation resistance detection and measurement system]. Available at: <http://disk.sibsau.ru/index.php/s/TaJhLx43LOxPnpn> (accessed 01.09.2017).

14. *GOST R MEK 61557-2–2005. Seti elektricheskoye raspredelitel'nye nizkovol'tnye napryazheniem do 1000 V peremennogo toka i 1500 V postoyannogo toka. Elektrobezopasnost'. Apparatura dlya ispytaniya, izmereniya ili kontrolya sredstv zashchity* [Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000 V a. c. and 1500 V d. c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 34 p.

15. Shtabel N. V., Kiselev P. A., Mizrakh E. A. [Continuous insulation resistance monitoring device for spacecraft power system test]. *Sbornik tezisov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov AO “ISS”*. Available at: <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf> (accessed 01.09.2017).