
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.311.24
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-234-240

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДАТЧИКА ИОННОГО ТОКА С ВОСЬМЬЮ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЩУПАМИ

А. С. БОЛДЫРЕВ, А. Л. ВЕРЕВКИН, А. Ю. БУДКО, Л. С. ВЕРЕВКИНА

*Южный федеральный университет, 347922, Таганрог, Россия
E-mail: lverevkina@sfnedu.ru*

Представлена методика определения надежности разработанного датчика ионного тока пламени для установок, работающих на органическом топливе. Датчик ионного тока с восьмью высоковольтными щупами измеряет одновременно как положительно, так и отрицательно заряженные ионы при температуре 70—125 °С. В системах мониторинга процессов горения требуется точная оценка надежности их компонентов. В предложенной методике структурный и вероятностный методы расчетов надежности дополнены преобразованиями с матрицами для компьютерного моделирования режимов работы. Приведены результаты расчетов надежности датчика с разным числом работающих щупов и различными схемами целочисленного, избыточного, скользящего, горячего, холодного и мажоритарного резервирования измерительных каналов. Такой подход к надежности позволяет более точно оценить риски, выбрать режимы работы датчика ионного тока и планировать его техническое обслуживание.

Ключевые слова: ионный ток, датчик, наработка на отказ, надежность, многоканальная схема, высоковольтный щуп

Введение. В современных системах контроля и мониторинга энергетических установок на органическом топливе, таких как поршневые и роторные двигатели внутреннего сгорания, тепловые электростанции, доменные печи, реактивные и турбореактивные двигатели, используются средства измерения, позволяющие оценить состояние процесса горения [1]. Ионный ток, пропорциональный концентрации сгораемого вещества, характеризует стадию процесса горения, а амплитудно-частотные параметры идентифицируются с процессом сгорания органического топлива [2]. Для мониторинга значений ионного тока необходим датчик, работающий в пламени при температуре 70—125 °С [3, 4].

Функциональная схема датчика ионного тока. Для измерения ионного тока, возникающего в пламени при подаче высокого напряжения до 20 кВ, разработаны высоковольтные щупы на диодах UF4007 и 2CL75. Функциональная схема датчика ионного тока на базе микроконтроллера STM32 представлена на рис. 1. Датчик оснащен восьмью измерительными каналами, по четырем из которых одновременно можно измерять ток положительных ионов, а по другим четырем каналам — ток отрицательных ионов. Каждый из высоковольтных щупов подключен к своему измерительному каналу.

Принципы функционирования предложенной схемы датчика, за счет большой ее гибкости, могут быть изменены. Для повышения надежности датчика возможно использование

различного числа измерительных щупов или их резервирование: мажоритарное, холодное (не нагруженное) или горячее (нагруженное). Множеством различных вариантов схем использования датчика ионного тока обуславливается необходимость однозначного и обобщенного расчета параметров его надежности. Это позволит на стадии проектирования оценить риски, выбрать режим работы и определить мероприятия по техническому обслуживанию при эксплуатации установок на органическом топливе [5].

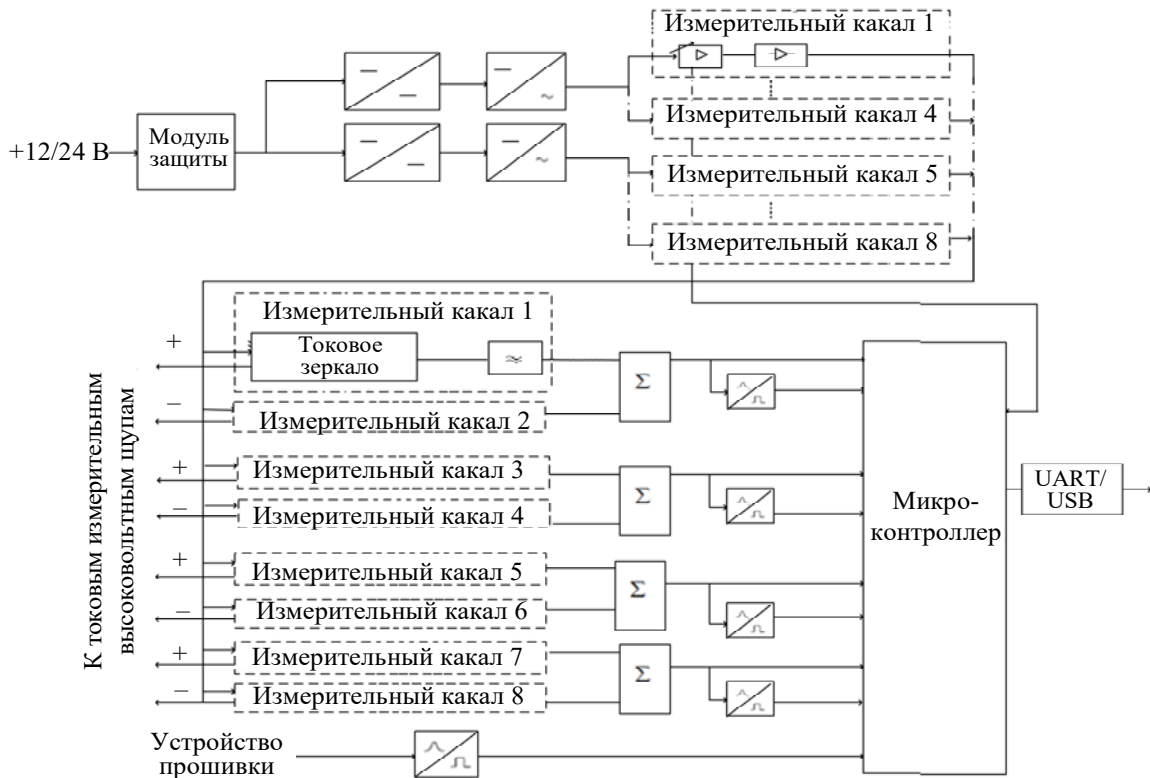


Рис. 1

Методика расчета надежности датчика ионного тока. Для расчета надежности датчика без резервирования щупов применяется структурный метод, а при холодном и горячем резервировании — вероятностный метод. Особенность методики заключается в использовании матриц для одновременного компьютерного моделирования надежности датчика при различных режимах работы.

Так как измерительные каналы равно надежны, полагаем, что вероятность отказа каждого канала носит экспоненциальный характер:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Классическим структурным методом строится структурная схема расчета надежности для расчлененной сложной системы, элементы которой объединяются в группы, обладающие следующими особенностями:

- для каждой группы S элементов определяются показатели надежности;
- группу $S=0$ составляют элементы, которые находятся в рабочем состоянии, независимо от числа работающих щупов;
- группу $S=R$ составляют элементы измерительного канала с порядковым номером щупа $R=1 \dots 8$.

Интенсивность отказов элементов групп $S=0$, $S=1$ для одного измерительного канала рассчитывается по формуле [6]

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^k p_i \lambda_i,$$

где p_i — число однотипных элементов в группе; λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; k — общее количество элементов.

Для расчета надежности датчика без резервирования предлагается составить матрицу Λ_{0R} интенсивностей отказов задействованных групп элементов при работе с $R = 1 \dots 8$ измерительными каналами. Умножив матрицу Λ_{0R} на 1, получим матрицу-столбец, строки которой — интенсивности отказа — соответствуют числу работающих измерительных каналов (от 1 до 8):

$$\Lambda_{0R} = \begin{pmatrix} \lambda_0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & \lambda_7 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & \lambda_7 & \lambda_8 \end{pmatrix} \cdot 1 = \begin{pmatrix} \lambda_{01} \\ \lambda_{02} \\ \lambda_{03} \\ \lambda_{04} \\ \lambda_{05} \\ \lambda_{06} \\ \lambda_{07} \\ \lambda_{08} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где λ_0 — интенсивность отказов элементов группы $S=0$; $\lambda_1 \dots \lambda_8$ — интенсивность отказов элементов измерительного канала $R = 1 \dots 8$.

Наработка на отказ определяется матрицей

$$T_{0R} = \begin{pmatrix} \lambda_{01} \\ \lambda_{02} \\ \lambda_{03} \\ \lambda_{04} \\ \lambda_{05} \\ \lambda_{06} \\ \lambda_{07} \\ \lambda_{08} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} T_{01} \\ T_{02} \\ T_{03} \\ T_{04} \\ T_{05} \\ T_{06} \\ T_{07} \\ T_{08} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Расчет надежности датчика при холодном резервировании измерительных каналов осуществляется вероятностным методом.

При целочисленном холодном резервировании наработка на отказ T_N схем $N=n+m$: $N=1+1, N=2+2, N=1+2, N=1+3$, определяется по формуле [7]

$$T_N = (n + m)T_1, \tag{4}$$

где n и m — число основных и резервируемых измерительных каналов соответственно; $T_1 = 1/\lambda_1$ — наработка на отказ одного измерительного канала.

Интенсивность отказов измерительных каналов при холодном целочисленном и избыточном их резервировании рассчитывается по формуле

$$\lambda_N = 1/T_N. \tag{5}$$

При скользящем холодном резервировании, когда число резервных измерительных каналов меньше числа основных и они находятся в выключенном состоянии, резервный измерительный канал включается взамен любого из отказавших. Для схем резервирования $N=3+1, N=2+1$ интенсивность отказов равна $n\lambda_1$, а средняя наработка на отказ каждой из схем определяется как [7]

$$T_N = (m+1)n\lambda_1.$$

Интенсивность отказов каждой из схем в этом случае рассчитывается по формуле (5).

Интенсивность отказов Λ_{0N} датчика в целом при холодном резервировании для схем $N=1+1, N=2+2, N=1+2, N=1+3, N=3+1, N=2+1$ определяется как

$$\Lambda_{0N} = \lambda_0 + \lambda_N. \quad (6)$$

Наработка на отказ датчика при холодном резервировании рассчитывается по формуле $T_{0N} = 1/\lambda_{0N}$ для каждой схемы.

Далее выполняется расчет надежности датчика при горячем (нагруженном) резервировании измерительных каналов вероятностным методом.

При горячем целочисленном резервировании наработка на отказ схем $N=2+1$, $N=2+2$ определяется по формуле

$$T_{2+2} = T_2 \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+m!},$$

где $T_2 = 1/2\lambda_1$ — наработка на отказ двух измерительных каналов.

Интенсивность отказов измерительных каналов при горячем резервировании определяется по формуле (5).

При избыточном горячем резервировании наработка на отказ схем $N=1+1$, $N=1+2$, $N=1+3$ определяется посредством матрицы $|T_N|$; каждая строка матрицы соответствует схеме резервирования:

$$T_N = \begin{vmatrix} \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & \frac{1}{1+2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & \frac{1}{1+2} & \frac{1}{1+3} & 0 \end{vmatrix} \cdot T_1 = \begin{vmatrix} T_{1+1} \\ T_{1+2} \\ T_{1+3} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Интенсивность отказов указанных схем в этом случае определяется как

$$\Lambda_N = \begin{bmatrix} T_{1+1} \\ T_{1+2} \\ T_{1+3} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{vmatrix} \lambda_{1+1} \\ \lambda_{1+2} \\ \lambda_{1+3} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

При скользящем горячем резервировании средняя наработка на отказ схем $N=3+1$, $N=2+1$ рассчитывается по формуле [7]

$$T_N = \frac{1}{n\lambda_1} + \frac{1}{(n+1)\lambda_1} + \dots + \frac{1}{(n+m)\lambda_1},$$

где n равно 2 или 3, $m=1$.

Результаты расчетов записываются в виде матрицы

$$T_N = \begin{vmatrix} T_{2+1} \\ T_{3+1} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Интенсивность отказов измерительных каналов при скользящем горячем резервировании определяется в виде матрицы

$$\Lambda_N = \begin{bmatrix} T_{2+1} \\ T_{3+1} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{vmatrix} \lambda_{2+1} \\ \lambda_{3+1} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Интенсивность отказов датчика в целом при горячем резервировании определяется по формуле (6), а наработка на отказ рассчитывается по формуле $T_{0N} = 1/\Lambda_{0N}$.

Расчет надежности датчика при мажоритарном резервировании измерительных каналов выполняется вероятностным методом. Предполагается, что результаты измерений верны, если сигналы двух измерительных каналов из трех задействованных при сравнении совпадают.

При мажоритарном резервировании двух каналов из трех формула для расчета времени наработки на отказ имеет следующий вид [8]:

$$T_{2 \text{ из } 3} = \frac{5}{6\lambda_1}.$$

Интенсивность отказов измерительных каналов рассчитывается по формуле $\lambda_{2 \text{ из } 3} = 1/T_{2 \text{ из } 3}$; интенсивность отказов датчика — по формуле $\Lambda_{0 \text{ 2 из } 3} = \lambda_0 + \lambda_{2 \text{ из } 3}$; наработка на отказ датчика — по формуле $T_{0 \text{ 2 из } 3} = 1/\Lambda_{0 \text{ 2 из } 3}$.

На основании проведенных расчетов формируется сводная таблица параметров надежности датчика ионного тока.

Численный расчет надежности датчика ионного тока. Расчет и моделирование схем надежности датчика ионного тока с применением предложенной методики выполнены с использованием ПО MathCad. Исходные интенсивности отказов элементов высоковольтного щупа и восьми измерительных каналов взяты из базы данных [9].

Результаты расчетов надежности датчика ионного тока без резервирования с числом измерительных каналов от 1 до 8 представлены в табл. 1, а графики вероятности безотказной работы показаны на рис. 2.

Таблица 1

Параметр	Число измерительных каналов n							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_i \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$	104,1	197,9	291,7	385,5	479,4	573,2	656,7	760,8
$T_{0R}, \text{ ч}$	99604	5052	3428	2594	2086	1745	1499	1314

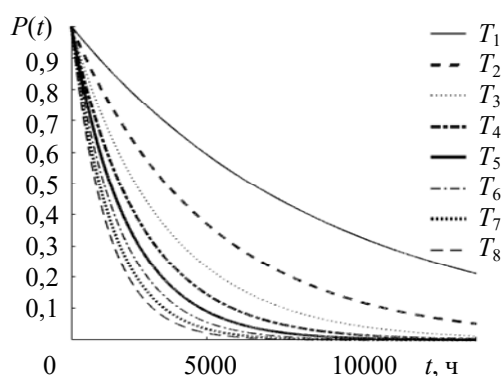


Рис. 2

Расчет надежности датчика с резервированием измерительных каналов выполнен для всех схем, рассмотренных в методике, результаты представлены в табл. 2—4.

Таблица 2

Параметр	Холодное резервирование, схема $n + m$					
	1+1	2+2	1+2	1+3	2+1	3+1
$\lambda_{0N} \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$	9,069	0,379	8,2697	7,5997	104,12	151,03
$T_{0N}, \text{ ч}$	110 263,8	26 371,6	120 923,6	131 583,4	9604,0	6621,3

Таблица 3

Параметр	Горячее резервирование, схема $n + m$					
	2+2	1+1	1+2	1+3	3+1	2+1
$\lambda_{0N} \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$	135,393	72,853	61,576	55,414	171,13	132,885
$T_{0N}, \text{ ч}$	7385,9	13726,3	16240,1	18045,9	5843,51	7525,3

Таблица 4

Параметр	Мажоритарное резервирование	
	Схема 2 из 3	Схема 3 из 4
$\lambda_{0N} \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$	119,76	151,028
$T_{0N}, \text{ ч}$	8350,2	6621,29

Анализ табл. 1—4 позволяет сделать вывод, что датчик ионного тока обеспечивает удовлетворительные параметры надежности и наработки на отказ с двумя измерительными каналами: без резервирования — 5052 ч; при горячем резервировании — 7385,9 ч; при холодном резервировании — 26 371,6 ч, при мажоритарном резервировании 2 из 3 — 8350,2 ч.

Заключение. Разработка схемы датчика ионного тока высокой надежности и гибкой структуры относится к инновационным технологиям. Предложенная методика позволяет рассчитывать надежность датчика с разным числом измерительных каналов и при различных способах резервирования. Выбор схемы резервирования измерительных каналов позволяет обеспечивать требуемую надежность и безопасность, оценивать риски, а также планировать техническое обслуживание систем мониторинга процесса горения.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям, грант № 2371ГС1/39054.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясников И. С., Ивашин П. В., Шайкин А. П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 11. С. 39—43.
2. Ивашин П. В., Рамазанов М. П., Твердохлебов А. Я., Шайкин А. П. О возможности оценки работы цикла двигателя внутреннего сгорания ионизационным зондом // Вектор науки ТГУ. 2012. № 4 (22). С. 165—168.
3. Будко А. Ю. и др. Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 4. С. 256—263.
4. Будко А. Ю. и др. Исследование влияния резистивной компоненты измерительной цепи на погрешность измерения ионного тока в камере сгорания ДВС. // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 [Электронный ресурс]: <ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3779>.
5. Вережкина Л. С., Алпатова О. В., Вережкин А. Л. Стадии разработки и уровни расчета надежности // Материалы Междунар. форума „Человек в современном мире“; Всемирный технологический университет ЮНЕСКО, Моск. технолог. ин-т. Ростов-на-Дону: Гинго, 2014. Вып. 2. С. 308—312.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т. 5. Проектный анализ надежности. М.: Машиностроение, 1988. 316 с.
7. <https://cyberpedia.su/15x7d01.html>
8. https://portal.tpu.ru/SHARED/a/ALEXYEFREMOV/tutoring/Tab/Reliability_lectures.pdf
9. Свид. о гос. рег. базы данных, № 2019621637. Надежность компонентов многофункциональных, робототехнических и автоматизированных систем / А. С. Болдырев, Л. С. Вережкина, А. Л. Вережкин. 09.09.2019.

Сведения об авторах

- Антон Сергеевич Болдырев** — канд. техн. наук; Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления; директор;
E-mail: boldyrev@sfedu.ru
- Александр Леонидович Вережкин** — аспирант; Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления; кафедра летательных аппаратов;
E-mail: l.valchack@yandex.ru
- Артём Юрьевич Будко** — канд. техн. наук; Южный федеральный университет, НИИ робототехники и процессов управления; ст. научный сотрудник;
E-mail: artem_budko@mail.ru
- Лина Станиславовна Вережкина** — канд. техн. наук; Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления; кафедра электротехники и мехатроники; доцент; E-mail: lverevkina@sfedu.ru

Поступила в редакцию
25.07.2020 г.

Ссылка для цитирования: Болдырев А. С., Вережкин А. Л., Будко А. Ю., Вережкина Л. С. Методика определения надежности датчика ионного тока с восьмью высоковольтными шупами // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 234—240.

METHOD FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF THE ION CURRENT SENSOR WITH EIGHT HIGH-VOLTAGE PROBES

A. S. Boldyrev, A. L. Verevkin, A. Yu. Budko, L. S. Verevkina

Southern Federal University, 347922, Taganrog, Russia
E-mail: lverevkina@sfedu.ru

A methodology designed to determine the reliability of developed flame ion current sensor is presented. The sensor is intended for installations running on organic fuel: piston, rotary internal combustion engines; thermal power plants; jet and turbojet engines. The ion current sensor simultaneously measures both positive and negative charged ions at a temperature of 70-125 °C with eight high-voltage probes. Increased requirements for the reliability of components of combustion monitoring systems require an accurate assessment of their reliability and are dictated by safety requirements. In the proposed methodology the structural and probabilistic methods for calculating reliability are supplemented by transformations with matrices for modeling computer operating modes. The reliability is calculated with a various number of working probes and different schemes of integer, redundant, sliding, hot, cold and majority redundancy of measuring channels. Such an approach to reliability allows to assess the risks more accurately, select the operating modes of the ion current sensor, and plan maintenance.

Keywords: ion current, sensor, time to failure, reliability, multi-channel circuit, high-voltage probe

REFERENCES

1. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin A.P. *Technical Physics*, 2013, no. 11(83), pp. 1587–1591.
2. Ivashin P.V., Ramazanov M P., Tverdokhlebov A.Ya., Shaikin A.P. *Vector of science TSU*, 2012, no. 4(22), pp. 165–168. (in Russ.)
3. Budko A. Yu. et al. *Mechatronics, automation, management*, 2017, no. 4(18), pp. 256–263. (in Russ.)
4. ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3779. (in Russ.)
5. Verevkina L.S., Alpatova O.V., Verevkin A.L. *UNESCO World University of Technology*. Moscow Institute of Technology, Materials of the International Forum. Is. 2. "Man in the Modern World", Rostov-na-Donu, 2014, pp. 308–312. (in Russ.)
6. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: Spravochnik: v 10 t. T .5. Proyektnyy analiz nadezhnosti* (Reliability and Efficiency in Engineering: Reference. Vol. 5. Project analysis of reliability), Moscow, 1988, 316 p. (in Russ.)
7. <https://cyberpedia.su/15x7d01.html>.
8. https://portal.tpu.ru/SHARED/a/ALEXYEFREMOV/tutoring/Tab/Reliability_lectures.pdf.
9. Certificate of state registration of the database no. 2019621637, *Nadezhnost' komponentov mnogo-funktional'nykh, robototekhnicheskikh i avtomatizirovannykh sistem* (Reliability of Components of Multifunctional, Robotic and Automated Systems), A.S. Boldyrev, L.S. Verevkina, A.L. Verevkin, 09.09.2019. (in Russ.)

Data on authors

- Anton S. Boldyrev** — PhD; Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control; Director of the Institute;
E-mail: boldyrev@sfedu.ru
- Aleksander L. Verevkin** — Post-Graduate Student; Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Department of Aircrafts;
E-mail: l.valchack@yandex.ru
- Artem Yu. Budko** — PhD; Southern Federal University, Research Institute of Robotics and Control Processes; Senior Scientist;
E-mail: aptem_budko@mail.ru
- Lina S. Verevkina** — PhD; Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Department of Electrical Engineering and Mechatronics; Associate Processor; E-mail: lverevkina@sfedu.ru

For citation: Boldyrev A. S., Verevkin A. L., Budko A. Yu., Verevkina L. S. Method for determining the reliability of the ion current sensor with eight high-voltage probes. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 234–240 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-234-240