

**Панычев Сергей Андреевич** – Южный федеральный университет; e-mail: panychev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.

**Панычев Андрей Иванович** – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; тел.: 88634371634; к.т.н.; доцент.

**Максимов Александр Викторович** – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; к.т.н.; доцент.

**Panychev Sergey Andreevich** – Southern Federal University; e-mail: panychev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.

**Panychev Andrey Ivanovich** – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Maksimov Alexander Viktorovich** – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.518.5

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-280-289

**А.В. Хлуденев**

### **ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И СОПТ**

*Целью исследования является разработка способа параметрического согласования устройств контроля изоляции, систем оперативного постоянного тока и дискретных входов релейной защиты. Использование для питания устройств релейной защиты и других ответственных потребителей изолированных систем оперативного постоянного тока позволяет обеспечивать при их эксплуатации высокую надежность и безопасность. Бесперебойность электроснабжения этих потребителей должна обеспечиваться даже при коротких замыканиях на землю одного из полюсов сети оперативного тока. Гарантией высокой надежности электроснабжения является мониторинг сопротивления изоляции сети и оперативное выполнение ремонтных работ при его снижении ниже критического уровня, задаваемого уставкой. В статье рассматриваются причины, приводящие к опасным уровням асимметрии напряжений полюсов сети относительно земли и ложным срабатываниям дискретных входов релейной защиты при замыкании на землю подключенных к ним сигнальных линий. Предложен основанный на методе многовариантного анализа по постоянному току способ определения согласованных значений уставок контроля изоляции, параметров сети оперативного тока и параметров дискретных входов релейной защиты, при которых устраняются условия появления таких аварий. Также рассмотрено влияние устройств контроля изоляции в системах оперативного постоянного тока на асимметрию напряжений полюсов и работу релейной защиты. Предложена модификация активного метода мониторинга сопротивления изоляции, при которой не возникает дополнительная опасная асимметрия напряжений полюсов сети и дополнительные риски ложных срабатываний релейной защиты. Применение модифицированного метода мониторинга в условиях перекоса напряжений полюсов сети приводит к сужению рабочих участков статических характеристик измерительных преобразователей напряжений полюсов и тока утечки. Получены оценки возникающего в этих режимах увеличения погрешности при измерении сопротивления изоляции.*

*Система оперативного постоянного тока; сопротивление изоляции; устройство контроля изоляции; релейная защита; асимметрия напряжений; ложное срабатывание; погрешность измерения.*

**A.V. Khludenev**

### **PARAMETRIC MATCHING OF INSULATION MONITORING DEVICES AND DC DISTRIBUTION SYSTEMS**

*The aim of the study is to develop a method for parametric matching of insulation monitoring devices, unearthed DC distribution systems and discrete inputs of relay protection. The use of unearthed DC distribution systems for power supply to relay protection devices and other responsible consumers makes it possible to ensure high reliability and safety dur-*

*ing their operation. It is necessary to ensure uninterrupted power supply to these consumers even in the event of a ground fault in one of the DC distribution network poles. Insulation monitoring of the network poles and the prompt execution of repair work when the insulation resistance falls below the critical level set by the response value, are a guarantee of high reliability of power supply. The article discusses the reasons leading to dangerous levels of pole voltage unbalance and false triggering of relay protection discrete inputs during ground faults of the signal lines connected to them. A method based on multivariate DC analysis is proposed to determine the matched insulation monitoring response value with the DC network parameters and discrete inputs parameters, when the conditions for the occurrence of such accidents are excluded. The influence of insulation monitoring devices in a DC system on pole voltages unbalance and relay protection operation is also considered. A modification of the insulation monitoring active method is proposed, which does not create additional pole voltage unbalance and risks of relay protection misoperation. The operating range of the static characteristics of the pole voltages and leakage current measuring transducers is narrowed in the grid unbalanced modes by using a modified active insulation monitoring method. Estimates of the increase in the insulation resistance measurement error arising in these modes are obtained.*

*Unearthed DC distribution system; insulation resistance; insulation monitoring device; relay protection; voltage unbalance; misoperation; measurement error.*

**Введение.** Низковольтные изолированные системы оперативного постоянного тока (СОПТ) используют для питания оборудования высоковольтных подстанций, в том числе, устройств релейной защиты. Для обеспечения высокой надежности и безопасности СОПТ при их эксплуатации должен быть обеспечен контроль сопротивления изоляции полюсов относительно земли. Требования к устройствам контроля изоляции (УКИ) устанавливает стандарт IEC 61557-8 [1].

При замене электромеханических реле на микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МПРЗА), а также замене традиционных реле контроля изоляции на современные электронные УКИ возникла проблема их эксплуатации на подстанциях. Проблема заключается в появлении случаев ложного срабатывания релейной защиты в момент замыкания на землю дискретного входа МПРЗА при асимметрии напряжений полюсов сети СОПТ.

**Историческая справка.** История вопроса связана с эволюцией требований к СОПТ и УКИ, сформулированных в стандартах ПАО "ФСК ЕЭС". В версии стандарта 2010 года [2] сформулированы требования к сопротивлению полюсов СОПТ относительно земли с учетом внутреннего сопротивления электроприемников (не менее 150 кОм). Определено требование к УКИ формировать сигнал в АСУ ТП при снижении сопротивления одного или двух полюсов сети СОПТ ниже 135 кОм.

На практике выполнять эти требования не всегда удавалось. Уставку предупредительной сигнализации УКИ традиционно занижали до уровня от 40 до 50 кОм, а аварийной – от 4 до 10 кОм. При использовании УКИ с высоким внутренним сопротивлением на землю неоднократно фиксировались ложные срабатывания МПРЗА. В стандарте [3] для формирования аварийного сигнала «земля в сети» определен порог 20 кОм. Эта мера не могла решить проблему.

Анализ причин ложных срабатываний МПРЗА [4, 5] выявил влияние внутреннего сопротивления УКИ на асимметрию напряжений полюсов. На основе опыта эксплуатации реле контроля изоляции с относительно низким сопротивлением обмотки [6, 7] для решения проблемы рекомендовано балансировать сеть резисторами сопротивлением до 9 кОм [5].

В 2012 году проведена ревизия стандарта [2], сформулированы требования к допустимому перекосу напряжений полюсов СОПТ относительно земли и требование к УКИ выполнять его мониторинг. Для исключения рисков неправильной работы МПРЗА сформулированы жесткие требования к входному сопротивлению и чувствительности дискретных входов [8, 9].

Стандарт [10] разработан под влиянием точки зрения, изложенной в [5]. Введено понятие блока формирования нейтрали (БНФ) для снижения перекоса напряжений полюсов сети и требование работы УКИ без отключения БНФ. Пересмотрены требования к уставкам УКИ (в диапазоне от 20 до 100 кОм). Стандарт подвергался критике [11] за недостаточную жесткость требований к сопротивлению симметрирующих сеть резисторов (не более 30 кОм).

В основе требований различных версий стандартов на СОПТ лежат конкурирующие частные решения. Этим можно объяснить сложность их выполнения в различных условиях. Поиск универсальных решений основан на методах расчета согласованных значений параметров СОПТ и УКИ, в том числе, на основе моделирования переходных процессов при коротком замыкании на землю дискретного входа [12], построения аналитических моделей СОПТ [13, 14, 15] и численного анализа статических режимов [16, 17].

**Постановка задачи.** Эквивалентная схема замещения СОПТ напряжением 220 В, питающей цепь дискретного входа МПРЗА с входным сопротивлением  $R_{in}$ , приведена на рис. 1. При включенном состоянии дискретного датчика типа сухой контакт  $SI$  логический сигнал на выходе изолированного оптроном формирователя  $D_{in} = 1$ . Элементы  $R_{iso+}$ ,  $R_{iso-}$ ,  $C^+$ ,  $C^-$  учитывают сопротивление изоляции и паразитные емкости полюсов сети на землю. Общее сопротивление изоляции  $R_{iso} = R_{iso+} \parallel R_{iso-}$ . Для снижения асимметрии напряжений полюсов  $V_{asym} = V^+ + V^-$  относительно земли установлены резисторы  $R_d^+$ ,  $R_d^-$ .

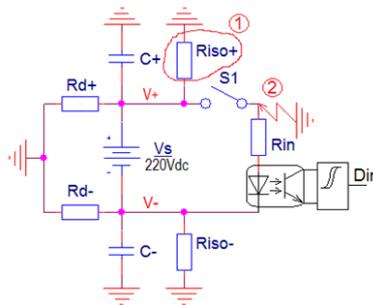


Рис. 1. Эквивалентная схема СОПТ

Рассмотрим случай, когда датчик  $SI$  выключен и произошло снижение сопротивления изоляции положительного полюса  $R_{iso+}$ . С момента  $t = 0$  замыкания на землю линии, которой  $SI$  связан с дискретным входом, напряжение отрицательного полюса будет изменяться:

$$V^-(t) = V^-(0) \cdot e^{-t/\tau} + V^-(\infty) \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

где  $\tau = (C^+ + C^-) (R_{iso} \parallel R_{in} \parallel R_d^+ \parallel R_d^-)$  постоянная времени цепи для  $t > 0$ . Аналитические решения для значений  $V^-(0)$  и  $V^-(\infty)$  приведены [5] и [15].

Дискретный вход будет находиться под напряжением  $(-V^-(t))$ . Ложное срабатывание дискретного входа (рис. 2) произойдет через интервал задержки срабатывания  $t_{delay}$  при превышении его порога срабатывания  $V_{tr}$ :

$$|V^-(t_{delay})| \geq V_{tr}. \quad (2)$$

Ложное срабатывание дискретного входа является аварийным событием, которое может произойти вследствие кратного отказа:

1) критического асимметричного снижения сопротивления изоляции СОПТ, при котором выполняется условие (2);

2) короткого замыкания на землю проводника, подключенного к дискретному входу МПРЗА.

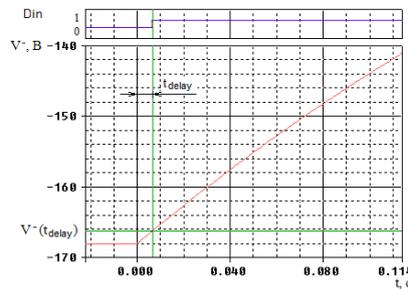


Рис. 2. Ложное срабатывание дискретного входа

Вероятность такого отказа ничтожно мала, если:

1) уровень уставки УКИ  $R_{isomin}$  согласован с параметрами дискретных входов  $V_{tr}$ ,  $R_{in}$ ,  $t_{delay}$  и параметрами СОПТ  $C^+$ ,  $C^-$ ,  $R_d = R_d^+ = R_d^-$  таким образом, что при  $R_{iso} > R_{isomin}$  условие (2) не выполняется;

2) УКИ формирует сигнал при снижении  $R_{iso}$  к уровню уставки  $R_{isomin}$ , а оперативный персонал своевременно устраняет причины снижения.

Если уставка УКИ задана ниже допустимого уровня, то причины снижения сопротивления изоляции своевременно не будут устраняться. Вероятность ложного срабатывания дискретных входов повышается многократно.

Поиск способов определения согласованных значений параметров СОПТ, параметров дискретных входов и уставки УКИ является задачей исследования.

**Общее решение задачи.** Решение задачи поиска согласованных значений параметров может быть найдено в виде допустимых значений  $R_d$  для заданных значений  $R_{iso+} = R_{isomin}$ ,  $R_{iso-} = \infty$  (при максимальной асимметрии полюсов сети) и известных значениях параметров  $C^+$ ,  $C^-$ ,  $V_{tr}$ ,  $R_{in}$ ,  $t_{delay}$  путем подстановки в (1) при выполнении условия:

$$|V^-(R_d, R_{iso+}, R_{in}, C^+, C^-, t = t_{delay})| < V_{tr}. \quad (3)$$

Если учитывать уровень допускаемой погрешности при измерении  $R_{iso}$  [1], а также погрешности определения значений  $C^+$ ,  $C^-$  и разброс параметров дискретных входов  $V_{tr}$ ,  $R_{in}$ ,  $t_{delay}$ , этот способ является неоправданно сложным.

Поиск решения можно существенно упростить, если от динамической задачи перейти к задаче статической. Время задержки срабатывания дискретных входов настраивается в диапазоне от 0 до 20 мс, а паразитные емкости полюсов сети составляют от 5 до 200 мкФ, значение  $R_{in}$  от 40 до 60 кОм [8, 9]. Будем полагать, что сопротивление изоляции  $R_{iso+}$  не менее 4 кОм, тогда  $\tau \gg t_{delay}$ . Чтобы получить решение для наилучшего случая ( $t_{delay} = 0$ ), можно пренебречь изменением  $V^-(t)$  в течение интервала  $t_{delay}$ . Тогда интересные соотношения параметров  $R_d$ ,  $R_{iso+}$ , при которых невозможно ложное срабатывание дискретного входа, можно определить из условия:

$$|V^-(R_d, R_{iso+})| < V_{tr}. \quad (4)$$

Значения левой части (4) можно находить методом многовариантного анализа по постоянному току, используя схемные симуляторы. Уравнения цепи должны быть сформированы для  $t = 0^-$  при отключенном дискретном входе.

**Результаты компьютерного моделирования.** Использовался симулятор OrCAD PSpice A/D v.17.2 и режим анализа DC Sweep [18]. На рис. 3 приведены результаты расчета, когда значение  $R_{iso+}$  изменялось по логарифмическому закону в диапазоне от 1 до 200 кОм в Primary Sweep,  $R_d$  принимало значения из ряда 9, 30, 100, 360 кОм в Secondary Sweep. Задаваясь уровнем  $V_{tr}$ , для любого значения  $R_d$  можно получить границы допустимых значений  $R_{iso+}$ , чтобы найти уставку. Напри-

мер, при использовании дискретных входов с  $V_{tr} = 168$  В и приборов контроля изоляции серии Isometer компании Bender с  $R_d = 360$  кОм [5] ложные срабатывания исключаются, если уставка УКИ будет настроена на уровне не ниже 152 кОм. При использовании аналогичных дискретных входов и УКИ «ЭКРА-СКИ» с  $R_d = 9$  кОм [5] уставку можно снизить до 4 кОм.

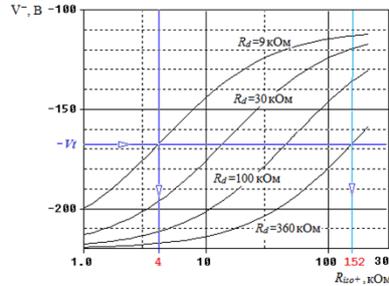


Рис. 3. Графики  $V^-(R_{iso+})$  для заданных значений  $R_d$

Чтобы определить предельно допустимое значение  $R_d$  по заданному значению  $V_{tr}$  и уровню уставки УКИ, удобнее поменять последовательность изменения  $R_{iso+}$  и  $R_d$ . На рис. 4 приведены результаты моделирования, когда значение  $R_d$  изменялось по логарифмическому закону в диапазоне от 9 до 360 кОм в Primary Sweep, сопротивление  $R_{iso+}$  принимало значения из ряда 20, 40, 135, 270 кОм в Secondary Sweep. Например, для дискретных входов с  $V_{tr} = 168$  В и при уставке 20 кОм, значение  $R_d$  не должно превышать 45 кОм.

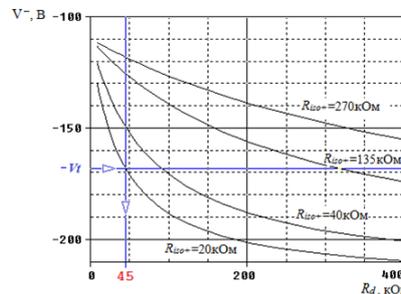


Рис. 4. Графики  $V^-(R_d)$  для заданных значений  $R_{iso+}$

**Влияние УКИ.** Мониторинг сопротивления изоляции в СОПТ основан на его непрерывном периодическом измерении. УКИ с активными методами измерения позволяют определять как симметричное, так и несимметричное снижение сопротивления изоляции полюсов, но производят помехоэмиссию и могут вызывать ложное срабатывание дискретных входов МПРЗА [5, 15, 19].

Активные методы измерения основаны на наложении на сеть постоянного тока переменного напряжения или двухполярных прямоугольных импульсов напряжения [15], на инъекции постоянного тока [20] или на коммутации резисторов между полюсами сети и землей [5]. Реализация последнего способа приведена на рис. 5. Потребители  $R_{load}$  получают питание от источника  $V_s$ . Резисторы  $R1$ ,  $R2$  поочередно подключаются к полюсам сети с помощью электронных ключей  $S1$ ,  $S2$ . Управление ключами и измерение текущих значений напряжений полюсов  $V^+(t)$ ,  $V^-(t)$  и тока утечки на землю  $I(t)$  выполняет микропроцессорный контроллер.

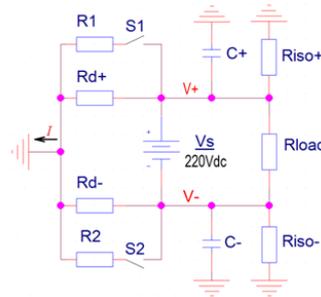


Рис. 5. Реализация активного метода измерения

Период коммутации состоит из четырех интервалов T1–T4, в течение которых ключи S1 и S2 находятся в состояниях:

- ◆ S1 включен и S2 выключен на интервале T1;
- ◆ S1 и S2 выключены на интервалах T2 и T4;
- ◆ S1 выключен и S2 включен на интервале T3.

После очередной коммутации S1, S2 их текущее состояние сохраняется до достижения установившихся значений (по уровню допустимой погрешности):

- ◆  $V_0^+, V_0^-$  – напряжений полюсов и тока утечки  $I_0$  на интервалах T2 и T4;
- ◆  $V_1^+, V_1^-$  – напряжений полюсов и тока утечки  $I_1$  на интервале T1;
- ◆  $V_3^+, V_3^-$  – напряжений полюсов и тока утечки  $I_3$  на интервале T3.

По результатам измерений общее сопротивление изоляции:

$$R_{iso} = \Delta V / \Delta I, \quad (5)$$

где  $\Delta V = V_3^+ - V_1^+ = V_3^- - V_1^-$  (при неизменном значении  $V_s$ );  $\Delta I = I_1 - I_3$ .

Сопротивления изоляции полюсов:

$$R_{iso+} = V_s / (-V_0^- / R_{iso} - I_0), \quad (6)$$

$$R_{iso-} = V_s / (V_0^+ / R_{iso} + I_0). \quad (7)$$

УКИ создает дополнительную асимметрию напряжений полюсов при включении S1 и S2. На рис. 6 показана временная диаграмма напряжения отрицательного полюса при  $R_d = 45$  кОм и  $R_{iso+} = 20$  кОм. Дополнительное снижение ( $V_0^- - V_1^-$ ) вследствие коммутации S1 достигает 5 вольт и может вызвать ложное срабатывание дискретных входов МПРЗА с  $V_w \leq 173$  В.

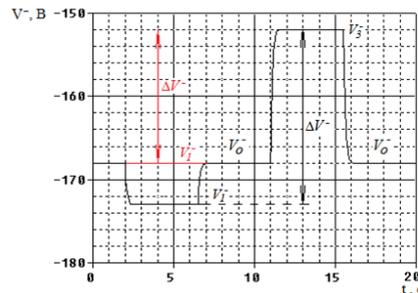


Рис. 6. Временные диаграммы напряжения  $V^-(t)$

Для исключения этих рисков предлагается модифицированный алгоритм работы УКИ с активным методом измерения. При появлении критического перекоса напряжений полюсов  $V_{asym}$  необходимо отказаться от поочередной коммутации

резисторов  $R1, R2$ . В этом случае необходимо разрешить периодическую коммутацию только одного из них. Обозначим пределы допустимых значений перекоса напряжений полюсов  $V_{neg}$  и  $V_{pos}$ . Тогда УКИ должно работать по правилам:

- 1) если  $V_{neg} < V_{asym} < V_{pos}$ , то поочередная коммутация  $R1$  и  $R2$ ;
- 2) если  $V_{asym} \geq V_{pos}$ , то коммутация  $R1$ , при этом  $V_3^+ = V_0^+$ ,  $V_3^- = V_0^-$  и  $I_3 = I_0$ ;
- 3) если  $V_{asym} \leq V_{neg}$ , то коммутация  $R2$ , при этом  $V_1^+ = V_0^+$ ,  $V_1^- = V_0^-$  и  $I_1 = I_0$ .

Измененный участок временной диаграммы  $V(t)$  для третьего случая на рис. 6 выделен красным цветом. В случае замыкания на землю линии дискретного входа напряжение на нем не превысит 168 В.

При  $V_{asym} \geq V_{pos}$  или  $V_{asym} \leq V_{neg}$  и отказе от коммутации одного из элементов  $R1$  или  $R2$  перепады напряжения  $\Delta V$  и тока утечки  $\Delta I$  будут существенно снижены. Например, при  $R_d = 45$  кОм и  $R_{iso+} = 20$  кОм,  $R_{iso-} = \infty$  перекося напряжений  $V_{asym} = -116$  В, снижение  $\Delta V$  (рис. 6) и  $\Delta I$  (рис. 7) будет составлять около 25%. Это приведет к удвоению приведенной относительной погрешности измерения  $R_{iso}$  в наихудшем случае.

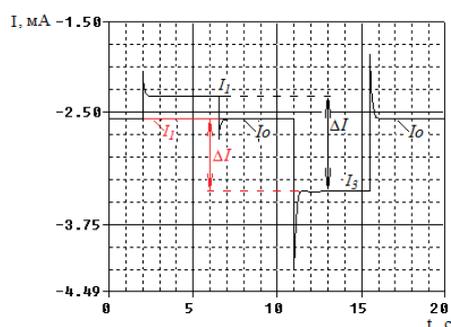


Рис. 7. Временная диаграмма тока утечки

**Заключение.** Несогласованность уровней уставок УКИ, сопротивления балансирующих сеть элементов и параметров дискретных входов создают условия для появления ложных срабатываний дискретных входов МПРЗА.

Предложен основанный на методе многовариантного анализа по постоянно-му току способ определения значений параметров балансирующих сеть элементов, согласованных с уставкой УКИ и параметрами дискретных входов. Эксплуатация СОПТ с согласованными значениями параметров позволяет исключить ложные срабатывания дискретных входов МПРЗА.

Предложен модифицированный алгоритм коммутации резистивных элементов между полюсами сети и землей при мониторинге сопротивления изоляции, который не создает дополнительные риски ложных срабатываний дискретных входов МПРЗА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEC 61557-8:2014 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1500 V d.c. – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures. – Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.
2. СТО 56947007-29.120.40.041-2010. Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.40.041-2010.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.041-2010.pdf).
3. СТО 56947007-29.120.40.093-2011. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.120.40.093-2011.pdf>.
4. Tang W.X. Protection misoperations caused by single-point grounding of DC circuit and AC-DC interference and countermeasures // Electric Power Automation Equipment. – 2007. – No. 27 (9). – P. 123-125.

5. Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Особенности контроля изоляции в цепях оперативного постоянного тока 220 В // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 3. – С. 36-41.
6. Галкин И.А., Шаварин Н.И., Иванов А.Б. Реле контроля уровня сопротивлений изоляции полюсов сетей оперативного постоянного тока ООО НПП «ЭКРА» типа РКИЭ // Релейная защита и автоматизация. – 2010. – № 1. – С. 26-28.
7. Алимов Ю.Н., Быков К.В., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Контроль изоляции в цепях оперативного постоянного тока электрических станций и подстанций // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 3. – С. 38-45.
8. СТО 56947007-29.120.40.102-2011. Методические указания по инженерным расчетам в системах оперативного постоянного тока для предотвращения неправильной работы дискретных входов микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, при замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока подстанций ЕНЭС. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto\\_56947007-29-120-40-102-2011\\_n.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29-120-40-102-2011_n.pdf).
9. Гусев Ю.П., Монаков Ю.В. Предотвращение срабатываний дискретных входов микропроцессорных релейных защит при замыканиях на землю в системах оперативного постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 91-93.
10. СТО 56947007-29.120.40.262-2018. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.40.262-2018.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.262-2018.pdf).
11. Галкин И.А., Виноградов А.Ю., Лопатин А.А. К вопросу о требованиях к оборудованию контроля сопротивления изоляции СОПТ, снижающих ложную работу устройств релейной защиты и автоматики // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 90-93.
12. Монаков Ю.В. Разработка рекомендаций по предотвращению срабатываний микропроцессорных средств защиты и автоматики энергообъектов от замыканий в системе оперативного тока: автореф. дис. кан. техн. наук. – М., 2013. – 20 с.
13. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems // Lecture Notes in Electrical Engineering. – Vol. 314. – Springer, 2014.
14. Olszowiec P. О выборе уставок устройств контроля изоляции сетей постоянного тока // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 166-175.
15. Olszowiec P. Influence of insulation monitoring devices on the operation of DC control circuits // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 50, No. 6, – P. 653-656.
16. Хлуденев А.В. Пофидерный контроль сопротивления изоляции изолированных сетей постоянного тока // Матер. II Международной научно-технической конференции «Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации». – Уфа: УГАТУ, 2019. – С. 213-217.
17. Khludenev A. Insulation Monitoring Impact on Relay Protection Malfunction // In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2020. – P. 58-61. – DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278485.
18. Fitzpatrick D. Analog Design and Simulation using OrCAD Capture and PSpice. – 2nd ed. – Newnes. – 2018. – 438 p.
19. Yow-Chyi Liu, En-Chih Chang, Yong-Lin Lee, Yu-Zhong Lin. Detection of Ground Insulation Faults in Ungrounded DC Power Supply Systems by Using a DC Current Injection Method // In Proceedings of the 2018 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2018). – Nagoya, Japan, 2018. – P. 349-355. – DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.154.
20. Wen C., Chen M. Research on DC grounding finder to effectively prevent microcomputer protection malfunction caused by one-point grounding of secondary circuit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 512: 4th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2020). – 012152. – DOI: 10.1088/1755-1315/512/1/012152.

#### REFERENCES

1. IEC 61557-8:2014 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.
2. СТО 56947007-29.120.40.041 Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» [Operational D.C. systems of substations. Technical requirements. JSC FGC UES standard], 2010. Available: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.40.041-2010.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.041-2010.pdf).

3. STO 56947007-29.120.40.093 Rukovodstvo po proyektirovaniyu sistem operativnogo postoyannogo toka (SOPT) PS YENES. Tipovyye proyektnyye resheniya. Standart organizatsii OAO «FSK YEES» [D.C. Operative Systems Design Guide (DCOS) SS UNEG. Typical design decisions, JSC FGC UES Standard], 2011. Available: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.120.40.093-2011.pdf>.
4. Tang W.-X. Protection misoperations caused by single-point grounding of DC circuit and AC-DC interference and countermeasures, *Electric Power Automation Equipment*, 2007, No. 27 (9), pp. 123-125.
5. Alimov Yu.N., Galkin I.A., Shavarin N.I. Osobennosti kontrolya izolyatsii v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka 220 V [Features of insulation control in circuits of operational direct current 220V], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2011, No. 3, pp. 36-41.
6. Galkin I.A., Shavarin N.I., Ivanov A.B. Rele kontrolya urovnya soprotivleniy izolyatsii polyusov setey operativnogo postoyannogo toka OOO NPP «EKRA» tipa RKIE [Relay for monitoring the level of insulation resistance of poles of operational D.C. networks NPP "EKRA" LLC, type RKIE], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2010, No. 1, pp. 26-28.
7. Alimov YU.N., Bykov K.V., Galkin I.A., Shavarin N.I. Kontrol' izolyatsii v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka elektricheskikh stantsiy i podstantsiy [Insulation control in operating D.C. circuits of power plants and substations], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2013, No. 3, pp. 38-45.
8. STO 56947007-29.120.40.102-2011. Metodicheskiye ukazaniya po inzhenernym raschetam v sistemakh operativnogo postoyannogo toka dlya predotvrashcheniya nepravil'noy raboty diskretnykh vkhodov mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki, pri zamykaniyakh na zemlyu v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka podstantsiy ENES. Standart organizatsii OAO «FSK EES» [Methodical guidelines for engineering calculations in operational D.C. systems to prevent incorrect operation of discrete inputs of microprocessor relay protection and automation devices, in case of ground faults in the operational D.C. circuits of UNEG substations. JSC FGC UES standard]. Available: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto\\_56947007-29-120-40-102-2011\\_n.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29-120-40-102-2011_n.pdf).
9. Gusev Yu.P., Monakov Yu.V. Predotvrashcheniye srabatyvaniy diskretnykh vkhodov mikroprotsessornykh releynykh zashchit pri zamykaniyakh na zemlyu v sistemakh operativnogo postoyannogo toka [Prevention misoperation of discrete inputs of microprocessor relay protection of ground-fault cases in the operational D.C. systems], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Izvestiya vuzov. Electromechanics], 2013, No. 1, pp. 81-83.
10. STO 56947007-29.120.40.262 Rukovodstvo po proyektirovaniyu sistem operativnogo postoyannogo toka (SOPT) PS YENES. Tipovyye proyektnyye resheniya. Standart organizatsii OAO «FSK YEES» [D.C. Operative Systems Design Guide (DCOS) SS UNEG. Typical design decisions, JSC FGC UES Standard], 2018. Available: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.40.262-2018.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.262-2018.pdf).
11. Galkin I.A., Vinogradov A.Yu., Lopatin A.A. K voprosu o trebovaniyakh k oborudovaniyu kontrolya soprotivleniya izolyatsii SOPT, snizhayushchikh lozhnuyu rabotu ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki [On the issue of requirements for equipment for monitoring the insulation resistance of ODCS, that reducing the false operation of relay protection and automation devices], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2019, No. 1, pp. 90-93.
12. Monakov Yu.V. Razrabotka rekomendatsiy po predotvrashcheniyu srabatyvaniy mikroprotsessornykh sredstv zashchity i avtomatiki energoob"yektov ot zamykaniy v sisteme operativnogo toka: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of recommendations for the prevention of microprocessor-based protection and automation of power facilities from short circuits in the operating current system: cand. of eng. sc. diss. abstr.]. Moscow, 2013, 20 p.
13. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 314. Springer, 2014.
14. Olszowiec P. O vybore ustavok ustroystv kontrolya izolyatsii setey postoyannogo toka [About the response values choice of DC networks insulation monitoring devices], *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2013, Vol. 21, pp. 166-175.
15. Olszowiec P. Influence of insulation monitoring devices on the operation of DC control circuits, *Power Technology and Engineering*, March 2017, Vol. 50, no. 6, pp. 653-656. DOI: 10.1007/s10749-017.

16. *Khludenev A.V.* Pofidernyy kontrol soprotivleniya izolyatsii izolirovannykh setey postoyannogo toka [Feeder insulation monitoring of unearthed DC distribution networks], *Mater. II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel'noy informatsii»* [Materials of the II International Scientific and Technical Conference "Problems of Receiving, Processing and Transmitting Measurement Information"]. Ufa: USATU, 2019, pp. 213-217.
17. *Khludenev A.* Insulation Monitoring Impact on Relay Protection Malfunction, *In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russian Federation, 2020*, pp. 58–61. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278485.
18. *Fitzpatrick D.* Analog Design and Simulation using OrCAD Capture and PSpice, 2nd ed., Newnes, 2018, 438 p.
19. *Yow-Chyi Liu, En-Chih Chang, Yong-Lin Lee, Yu-Zhong Lin.* Detection of Ground Insulation Faults in Ungrounded DC Power Supply Systems by Using a DC Current Injection Method // *In Proceedings of the 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPSE 2018), Nagoya, Japan, 2018*, pp. 349-355. DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.154.
20. *Wen C., Chen M.* Research on DC grounding finder to effectively prevent microcomputer protection malfunction caused by one-point grounding of secondary circuit, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 512: 4th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2020), Hangzhou, China, 2020*, p. 012152. DOI: 10.1088/1755-1315/512/1/012152.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.М. Тутаев.

**Хлуденев Александр Владимирович** – Оренбургский государственный университет; e-mail: avhldenev@yandex.ru; г. Оренбург, Россия; тел.: +73532372874; кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники; к.т.н.; доцент.

**Khludenev Alexander Vladimirovich** – Orenburg State University; e-mail: avhldenev@yandex.ru; Orenburg, Russia; phone: +73532372874; industrial electronics and information measuring engineering department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.786, 62-529

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-289-299

**Т.Г. Цой**

### **ОЦЕНКА СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОЙ КАМЕРЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА «СЕРВОСИЛА ИНЖЕНЕР» В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

*Современные задачи специальных областей робототехники, включая поисково-спасательные операции в городских населенных пунктах, ставят ряд вызовов перед мобильной робототехникой. Одним из важных требований к алгоритмическому и программному обеспечению робота являются возможности автономного принятия решений и автоматического выполнения роботом различных функций как низкого, так и высокого уровня на основе заложенных алгоритмов и информации, получаемой с бортовых датчиков робота. На сегодняшний день самыми распространенными бортовыми датчиками робота являются камеры различных типов, что обусловлено их техническими возможностями и более низкой стоимостью относительно лидаров и других датчиков, предоставляющих визуальную информацию в виде цифровых изображений. Калибровка камер является необходимым процессом для извлечения точной информации из цифровых изображений. Данный процесс необходим для получения точного соответствия между трехмерным объектным пространством и пиксельным пространством изображения, для возможности последующего использования алгоритмов компьютерного зрения, комплексирования и обработки информации. Калибровка цифровых камер является неотъемлемой частью целого ряда практических задач машинного зрения: навигация мобильных робототехнических систем, медицина, реконструкция плотных и разреженных трехмерных карт окружения, видео-*