

## Авторы:

к.т.н. Алимов Ю.Н.,

заместитель технического  
директора по РЗА

к.т.н. Галкин И.А.,

ведущий инженер

отдела НКУ

к.т.н. Шаварин Н.И.,

заведующий отделом НКУ

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В ЦЕПЯХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА 220 В

Вопросы надежности сетей оперативного постоянного тока (СОПТ) тесно связаны с вопросами контроля изоляции. Традиционная схема контроля сопротивления изоляции СОПТ, основанная на использовании трех последовательно соединенных резисторов, одно из которых выполнено в виде потенциометра П2ДС и сигнального реле РН-51/32 [1], не позволяет определить присоединения с поврежденной изоляцией.

В системах оперативного постоянного тока нашли применение устройства контроля изоляции, позволяющие определить присоединения с ухудшенной изоляцией, например: «Микро-СРЗ» (НПЦ «Энергоавтоматика»), «Сапфир» и «Скиф» (Белэнергоремонтналадка), ИПИ-1М (ОРГРЭС), УКИ-МП и СПК (ЮРГТУ), устройства фирм ГОСАН, НИПОМ, Bender, Merlin Gerin и т.д. Эти устройства отличаются по применяемым способам измерения сопротивления изоляции и полученным на их основе характеристикам.

Проведенный анализ систем контроля изоляции показал, что эти устройства используют следующие способы измерения сопротивления изоляции, основанные на:

- наложении на сеть линейно-изменяющегося напряжения (ИПИ-1М);
- наложении на сеть одно или двухполярного напряжения прямоугольной формы от регулируемого источника постоянного тока (устройства ФГУП «ЦНИИ судовой электротехники и технологии»);
- наложении на сеть импульсов напряжения прямоугольной формы относительно земли (УКИ-3);
- наложении на сеть напряжения контрольного источника переменного тока («Сапфир», «Скиф», устройства НИПОМ, ГОСАН, Merlin Gerin);
- подключении к шинам аккумуляторной батареи R импеданса («Микро-СРЗ», устройства Bender);
- применении мостовой схемы с включением в ее диагональ измерительного прибора (УКИ-2).

Разработанные, на основе существующих способов, устройства контроля изоляции и поиска поврежденного присоединения отличаются главным образом следующими параметрами:

- предельное селективно определяемое сниже-

- сопротивление изоляции (10...50 кОм);
- максимальная суммарная емкость контролируемой сети (до 50 мкФ) и присоединения (до 5 мкФ);
- число автоматически контролируемых присоединений (до 247 шт.);
- величина напряжения генератора опорного сигнала (до 300 В) или величина инжектируемого в оперативную сеть тока (1... 50 мА);
- внутреннее сопротивление полюса устройства относительно земли (10...360 кОм).

Сравнение характеристик некоторых систем контроля изоляции приведено в таблице 1.

В стандарте ОАО «ФСК ЕЭС» «Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования» (приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» №191 от 29.02.2010) приведено следующее требование к системам контроля изоляции в СОПТ: поиск земли должен обеспечиваться без отключения электроприемников и без инъекции в сеть СОПТ токов, способных вызвать ложное срабатывание устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, при этом инжектируемый в сеть ток должен быть менее 1,8 мА.

Как видно, важной характеристикой устройств контроля изоляции оперативного постоянного тока и автоматического поиска поврежденного присоединения является исключение ложного срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) вследствие работы устройств контроля изоляции или ухудшения сопротивлений изоляции СОПТ при замыкании на землю в цепях РЗА.

При установке в сети СОПТ приведенных выше систем контроля изоляции, приходится исключать традиционную схему контроля сопротивления изоляции, так как ни одна из существующих систем контроля изоляции с автоматическим поиском поврежденного присоединения не позволяет совместную работу с традиционной схемой контроля сопротивления изоляции. Исключение из СОПТ стандартной схемы контроля изоляции на основе Т-образного моста, которая обладает малым (примерно 9 кОм) внутренним сопротивлением каждого полюса относительно «земли», повышает вероятность ложного срабатывания устройств РЗА.

Таблица 1. Сравнительные характеристики систем контроля изоляции.

Фирма	Диапазон измеряемых сопротивлений изоляции сети, КОМ	Максимально определяемое сопротивление изоляции поврежденного присоединения, КОМ	Максимальное число автоматически контролируемых присоединений	Амплитуда напряжения генератора контрольного тока при поиске поврежденного присоединения, В	Ток контрольного источника тока, МА	Максимальная емкость контролируемой сети, МКФ	Внутреннее сопротивление полюса устройства относительно земли, КОМ	Время поиска поврежденного присоединения, сек	Возможность работы со стандартной схемой контроля изоляции
Bender	1...10000	50	12...360	*	1...50	20	360	25	нет
Merlin Gerin	0.1...999	100	12...*	*	5	6...*	20	40...*	нет
НТЦ ГОСАН	*	50	32	350	25	30	*	180	нет
Белэнерго Ремналадка	1...100	50	20...100	70	*	30	*	*	нет
НТЦ Энергоавтоматика	2...16000	2...100	40...247	*	3.5	50	200	*	нет

\* Примечание. По этим позициям данные отсутствуют.

Данное утверждение основывается на проведенном анализе схемы замещения СОПТ (рис.1), где  $R_{д+}$  и  $R_{д-}$  сопротивления выравнивающих резисторов,  $R_{изол+}$  и  $R_{изол-}$  сопротивления изоляции соответственно положительного и отрицательного полюса СОПТ относительно «земли»,  $C_+$  и  $C_-$  – емкости полюсов соответственно положительного и отрицательного полюса СОПТ,  $R_{вх}$  – сопротивление обмотки реле повторителя, например, газовой защиты или входа платы дискретных сигналов 2, 3 – сухие контакты.

До замыкания на «землю» входа платы дискретных сигналов напряжение на положительном полюсе сети относительно «земли»  $U_+ = U_{АБ} * (R_{изол+} // R_{д+}) / (R_{изол+} // R_{д+} + R_{изол-} // R_{д-})$ , напряжение на отрицательном полюсе сети относительно «земли»  $U_- = U_{АБ} * (R_{изол-} // R_{д-}) / (R_{изол+} // R_{д+} + R_{изол-} // R_{д-})$ , где  $U_{АБ}$  – напряжение на аккумуляторной батарее. При этом напряжение на входе платы дискретных сигналов  $U_{вх} = 0$ . При сопротивлении изоляции, например,  $R_{изол+} = 100$  КОМ,  $R_{изол-} \geq 10$  МОМ и сопротивлении выравнивающих резисторов  $R_{д+} = R_{д-} = 200$  КОМ напряжения  $U_+ = 55$  В,  $U_- = 165$  В при на-

пряжении на аккумуляторной батарее  $U_{АБ} = 220$ В.

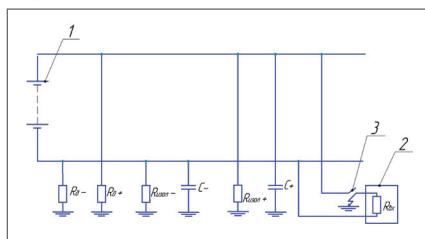


Рис.1.Схема замещения сети оперативного постоянного тока.

(1- аккумуляторная батарея; 2- реле повторителя, например, газовой защиты или плата дискретных сигналов РЗА; 3- сухие контакты).

При замыкании на «землю» платы дискретных сигналов напряжение на входе платы в момент замыкания скачком увеличивается до значения  $t = 2 * C * (R_{изол+} // R_{д+} // R_{изол-} // R_{д-} // R_{вх})$  уменьшается до величины  $U_{вх} = U_{АБ} * (R_{изол-} // R_{д-} // R_{вх}) / (R_{изол+} // R_{д+} + R_{изол-} // R_{д-} // R_{вх})$ . Например, при сопротивлении  $R_{вх} = 50$  КОМ напряжение на входе платы после завершения переходного процесса составит  $U_{вх} = 82$  В. При емкости сети  $C = 10$  МКФ

постоянная времени составит  $t = 0.5$  секунды, что достаточно для ложного срабатывания РЗА. Очевидно, что чем меньше величина выравнивающего сопротивления, тем меньше величина напряжения на дискретном входе при замыкании его на «землю».

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжений на входе (1) и выходе (2) платы дискретных сигналов при замыкании на землю входа платы для одного из случаев.

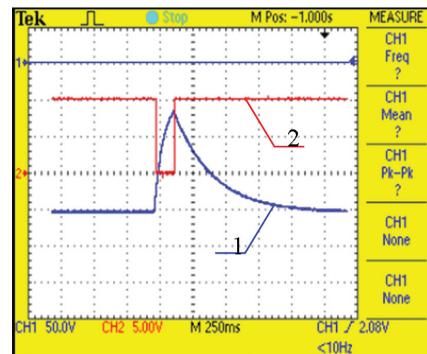


Рис.2. Осциллограмма напряжений на входе (1) и выходе (2) платы дискретных сигналов при замыкании на «землю» при  $R_{изол+} = 100$  КОМ,  $R_{изол-} \geq 10$  МОМ,  $R_{д+} = R_{д-} = 200$  КОМ,  $C = 10$  МКФ,  $U_{АБ} = 220$ В.

При сопротивлении выравнивающих резисторов  $R_{д+} = R_{д-} = 10$  КОМ и тех же величин сопротивлений изоляции и напряжении аккумуляторной батареи напряжение на входе платы в момент замыкания составит 115 В, что недостаточно для ложного срабатывания платы дискретных сигналов.

Кроме этого, при замыкании на «землю» платы дискретных сигналов, напряжение на входе платы зависит также от соотношения между сопротивлением  $R_{изол+}$  изоляции положительного полюса СОПТ относительно «земли» и сопротивлением  $R_{вх}$  – обмотки реле повторителя, например, газовой защиты или входа платы дискретных сигналов. Его величина определяется выражением  $U_{вх} = U_{АБ} * (R_{изол-} // R_{д-} // R_{вх}) / (R_{изол+} // R_{д+} + R_{изол-} // R_{д-} // R_{вх})$ . Например, при сопротивлении  $R_{вх} = 50$  КОМ,  $R_{изол+} = 10$  КОМ,  $R_{изол-} > 1$  МОм, напряжение на входе платы даже при использовании традиционной схемы контроля сопротивления изоляции составит  $U_{вх} = 138$  В,

что достаточно для ложной работы. Поэтому, для исключения ложного срабатывания устройств РЗА в СОПТ, устройство контроля изоляции с автоматическим определением поврежденного присоединения должно не только позволять совместную работу с традиционной схемой контроля изоляции, но и найти поврежденное присоединение с сопротивлением изоляции не менее 50 кОм.

В случае поиска поврежденного присоединения устройством контроля изоляции, величина напряжения на входе платы дискретных сигналов также не должна превышать 138 В. Анализ схемы СОПТ (рис.3) и проведенные исследования показали, что в случае поиска поврежденного присоединения устройством контроля изоляции, использующего наложение на сеть оперативного постоянного тока напряжения контрольного источника переменного тока («Сапфир», «Скиф», устройства НИ-ПОМ, ГОСАН, Merlin Gerin), при напряжении генератора контрольного тока 50В и при «металлическом» замыкании входа платы дискретных сигналов на «землю», практически при любом значении сопротивления изоляции положительного полюса аккумуляторной батареи на «землю» напряжение на входе платы дискретных входов превысит 138В, что может привести к появлению ложных сигналов устройств защиты.

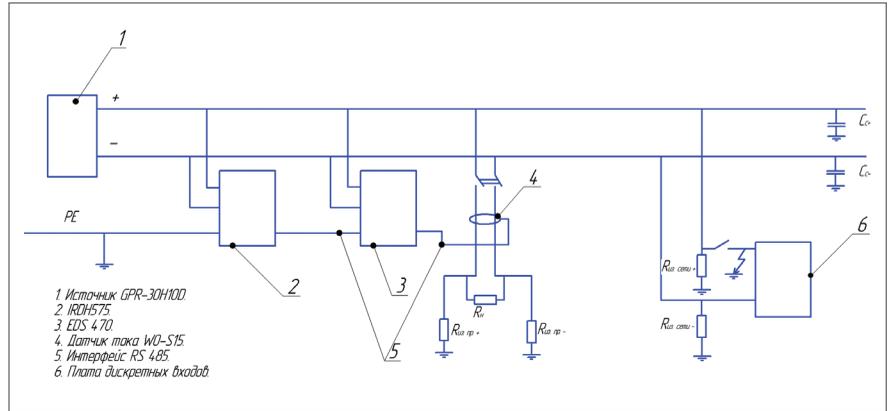


Рис.4. Схема испытаний устройства контроля изоляции Bender (IRDH-575, EDS470, датчик W0-S15)

В случае поиска поврежденного присоединения устройством контроля изоляции, использующего способ, основанный на подключении к шинам аккумуляторной батареи R импеданса (устройством IRDH-575 Bender), напряжение на поврежденном фидере в режиме поиска при токе 10мА и более достигает величины 180В при сопротивлении изоляции присоединения 20кОм и выше, что достаточно для срабатывания дискретного входа в случае металлического замыкания его на «землю» (рис.4, 5).

Применение устройств контроля изоляции для цепей газовой защиты трансформаторов в СОПТ, например, устройства «Орион-КИ», обычно связано с применением традиционной схемы кон-

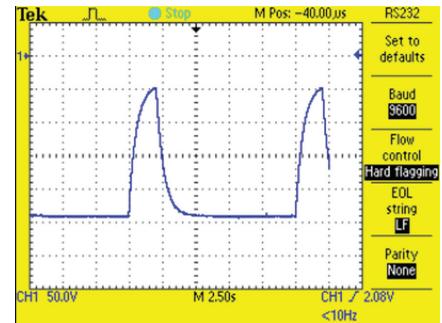


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на положительном полюсе сети оперативного тока в режиме поиска поврежденного присоединения устройством IRDH-575 при емкости сети 20 мкФ, сопротивлению изоляции 20 кОм и токе 10 мА.

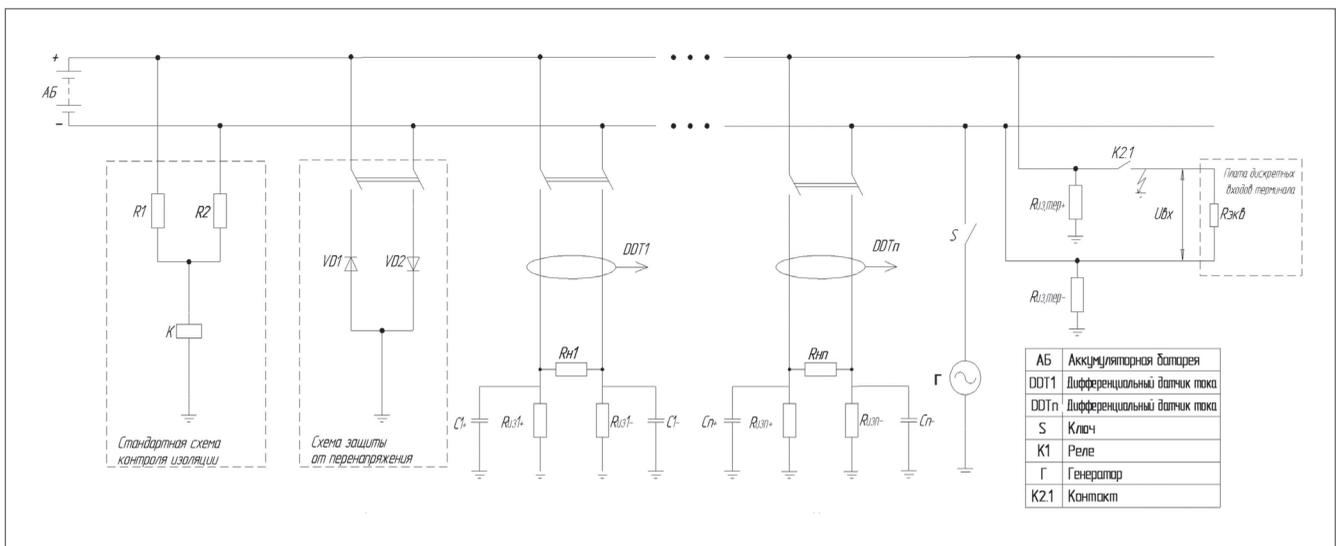


Рис.3. Упрощенная схема сети оперативного постоянного тока

троля сопротивления изоляции. В случае отказа от применения в СОПТ традиционной схемы контроля сопротивления изоляции, возможно ложная работа устройства «Орион-КИ» даже при хорошей изоляции кабеля, соединяющего контакты реле газовой защиты и входа «Орион-КИ». Проведенные исследования показали, что при сопротивлении изоляции кабеля, соединяющего контакты реле газовой защиты и входа «Орион-КИ»  $R_{каб}$  более 1 Мом и сопротивлении изоляции входа устройства «Орион-КИ» относительно земли  $R_{из\ вх}$  900 кОм при сопротивлении положительного полюса СОПТ  $R_{изол+}$  менее 100 кОм, происходит ложное срабатывание «Орион-КИ» (рис.6).

НПП «ЭКРА» получен патент на способ определения сопротивлений

изоляции присоединений в сети оперативного постоянного тока 220 В [2], на основе которого разработано устройство контроля изоляции, позволяющее совместную работу со стандартной схемой контроля сопротивления изоляции СОПТ и не вызывающее при контроле изоляции и поиске поврежденных присоединений ложных сигналов устройств релейной защиты.

Способ измерения сопротивлений изоляции сети постоянного тока основан на измерении напряжений между «землей» и ее полюсами, а также токов, протекающих по присоединениям сети после подключения сначала к одному, а затем к другому полюсу резистивного элемента при одновременном выравнивании напряжений на полюсах сети.

Схема системы оперативного постоянного тока с предлагаемым способом определения сопротивлений изоляций сети постоянного тока и поиска поврежденного присоединения, представлена на рис.7. На нем изображены: аккумуляторная батарея 14, нагрузки присоединений 1, 2, 3 с емкостями и активными сопротивлениями их изоляции, резистивные элементы 4 и 5, подключенные через ключи к полюсам + и – соответственно, устройства для измерений напряжения 6 и 7, дифференциальные датчики для измерения токов, протекающих по присоединения 1, 2, 3, резисторы 11, 12 соединенные последовательно и подключенные параллельно полюсам источника 14, резистор 13 подключенный между общей точкой резисторов 11, 12 и землей и дифференциальный датчик для измерения тока, протекающего по присоединению 16. Дифференциальные датчики 8, 9, 10 контролируют изоляцию присоединений 1, 2, 3. Дифференциальный датчик 15 контролирует изоляцию всей сети оперативного тока.

На основе разработанного способа измерения сопротивлений изоляции сети постоянного тока, создана система контроля сопротивлений изоляции в сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ», предназначенная для определения присоединений с поврежденной изоляцией без отключения потребителей от сети, а также для контроля сопротивлений изоляции каждого полюса относительно «земли» сети постоянного тока в целом.

На рис.8 приведена функциональная схема системы контроля изоляции «ЭКРА-СКИ».

В состав «ЭКРА-СКИ» входит:

- блок автоматики (БА) с панелью оператора (ПО) (рис.9);
- блок дополнительных резисторов (БДР) в случае отсутствия стандартной схемы контроля сопротивления изоляции;
- датчики дифференциальных токов ДДТ1...ДДТN контроля изоляции отдельных присоединений;
- дополнительные источники питания с выходным напряжением =24 В для питания блока автоматики и датчиков дифференциальных токов.

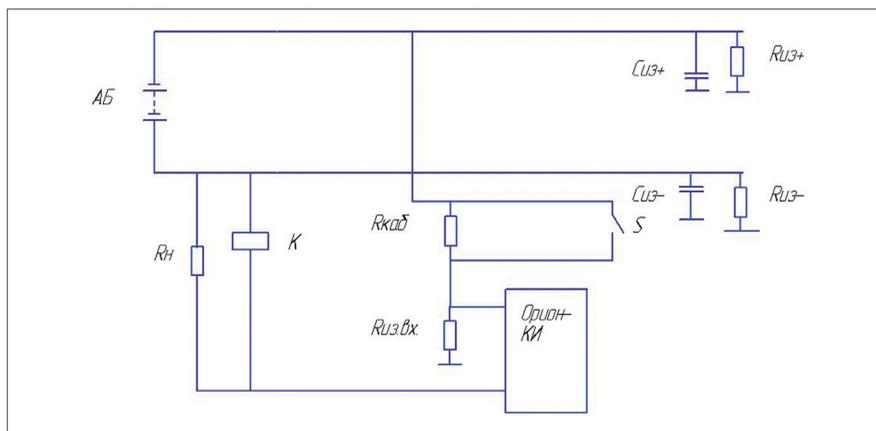


Рис.6. Пример подключения «Орион-КИ» в СОПТ

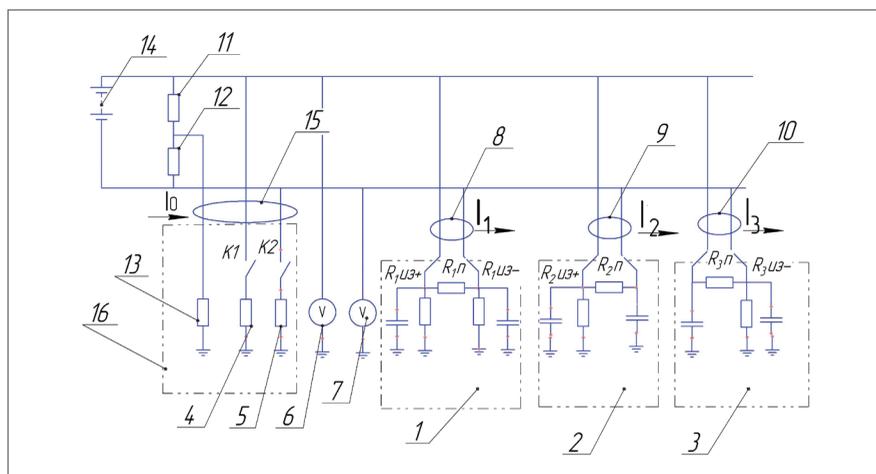


Рис.7. Схема системы оперативного постоянного тока с предлагаемым способом определения сопротивлений изоляций сети постоянного тока и поиска поврежденного присоединения

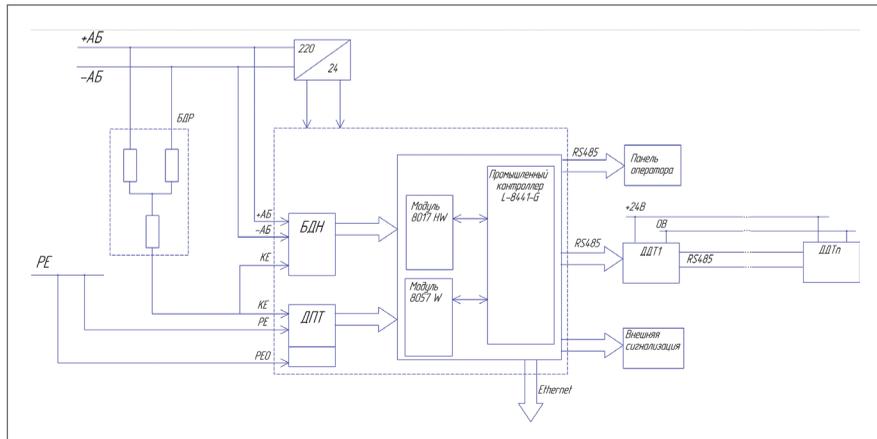


Рис.8. Функциональная схема системы контроля изоляции сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ».

В состав блока автоматики входит:

- блок делителей напряжения (БДН);
- датчик полного тока (ДПТ) контроля сопротивления изоляции сети оперативного тока в целом;
- контроллер совместно с модулем аналоговых входов и модулем дискретных выходов.



Рис.9. Внешний вид блока автоматики «ЭКРА-СКИ»

Система контроля изоляции в сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ» имеет два режима работы: режим контроля сопротивления изоляции полюсов сети оперативного тока и режим автоматического поиска поврежденного присоединения. В режиме контроля сопротивления изоляции полюсов сети оперативного тока производится контроль дифференциального тока присоединения блоков добавочных резисторов и делителей напряжений. В этом режиме производится контроль изоляции всей системы оперативного постоянного тока. В случае, если величина полного сопротивления сети становится ниже величины устав-

ки, заданной программно (на заводе-изготовителе установлено сопротивление изоляции сети значения 150 кОм), а также при истечения времени контроля сопротивления изоляции полюсов сети, заданного в меню панели оператора система «ЭКРА-СКИ», переходит в режим автоматического поиска поврежденного присоединения, при котором производятся измерения сопротивлений изоляции всех присоединений, на которых установлены датчики дифференциальных токов и всей сети оперативного постоянного тока в целом. Измерения производятся после подключения, поочередно - сначала к одному полюсу, а затем к другому полюсу контролируемой сети постоянного тока делителей напряжений, один из выводов которых соединен с «землей». Управляемые ключи и делители напряжений расположены в блоке делителей напряжений (БДН). Одновременно производится измерение напряжения между полюсами аккумуляторной батареи, а также напряжений на полюсах аккумуляторной батареи относительно «земли».

Величины значений сопротивлений плеч делителей напряжений выбраны таким образом, чтобы величина амплитуды напряжения смещения нейтрали в режиме измерения сопротивлений присоединений не превышала 15 В. Величина амплитуды напряжения на поврежденном фидере в режиме измерения сопротивления изоляции присоединения не превышает величины 130 В, что не достаточ-

но для срабатывания дискретного входа в случае металлического замыкания его на «землю» (рис.10).

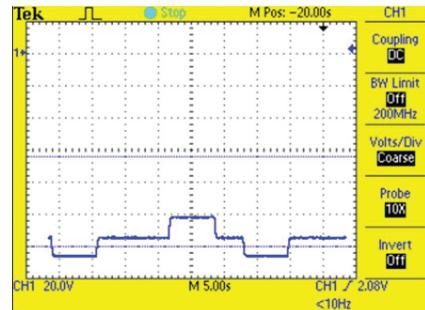


Рис.10. Осциллограмма напряжения на отрицательном полюсе сети постоянного оперативного тока в режиме измерения сопротивлений изоляции присоединений и всей сети оперативного тока.

Блок добавочных резисторов (БДР) включает в себя резисторы R1 и R2, которые имеют те же значения, что и в стандартной схеме контроля изоляции. Резистор R3 имеет значение 3,8 кОм, что соответствует эквивалентному сопротивлению обмотки реле РН-51/32. БДР выполняет функцию выравнивания напряжения на полюсах аккумуляторной батареи относительно «земли», связанного с ухудшением изоляции системы оперативного постоянного тока и отдельных присоединений, а также работой самой системы «ЭКРА-СКИ».

Контроллер управляет работой реле БДН и датчиков дифференциальных токов, а также на основе полученных значений напряжений от БДН и токов от датчиков дифференциальных токов, контроллер производит вычисление значений полного сопротивления изоляции всей системы, полного сопротивления изоляции каждого присоединения с указанием полярности поврежденного полюса.

Информация о состоянии изоляции присоединений и сети оперативного тока в целом выводится на панель оператора. Одновременно, на панель оператора выводится информация об исправности датчиков дифференциальных токов, об отклонении от нормы напряжения аккумуляторной батареи, об отклонении напряжений на полюсах контролируемой сети постоянного тока относительно «зем-

ли» от величины уставки, а также об исправности подсоединения системы «ЭКРА-СКИ» к шине «РЕ», об исправности интерфейса, связующего датчики дифференциальных токов и контроллер системы, об установленном режиме работы системы.

Блок автоматики имеет выход Ethernet для взаимодействия с АСУ ТП по протоколу 60870-5-104. Кроме этого контроллер ведет архив событий, текущие значения сопротивлений и архив событий можно посмотреть на компьютере.

Для контроля токов утечки в присоединениях СОПТ разработаны датчики дифференциальных токов, принцип работы такого которых основан на смещении петли гистерезиса магнитопровода в измерительной обмотке при появлении дифференциального тока в «плюсовом» и «минусовом» проводах присоединения (рис.11). Магнитопровод содержит также дополнительную тестовую обмотку, подключенную к источнику калибровочного тока, с помощью которой производится тестирование датчика. С помощью интерфейсного устройства RS485 датчики дифференциальных токов обмениваются сообщениями с контроллером блока автоматики. Каждый датчик дифференциального тока имеет свой адрес (1...255), который задается с помощью переключателя. Датчик дифференциального тока с адресом 0 установлен в блоке автоматики для измерения полного дифференциального тока.

На корпусе датчика расположены светодиоды желтого и красного цвета. Зажигание светодиода желтого цвета свидетельствует о приеме сигнала датчиком по интерфейсу RS485. Зажигание светодиода красного цвета в режиме постоянного свечения показывает о неисправности датчика.



Рис.11 Внешний вид датчиков дифференциальных токов

Зажигание светодиода красного цвета в импульсном режиме показывает снижение сопротивления изоляции присоединения ниже уставки «Предупреждение». На корпусе датчика имеется разъемы для подключения источника питания =24 В и выхода интерфейса RS485.

Основные параметры системы контроля изоляции в сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ» приведены в таблице 2.

Опытный образец системы контроля сопротивлений изоляции в сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ» находится в эксплуатации на ПС «Бугульма-110» с августа 2009 года. В настоящее время шкафы СОПТ с системой «ЭКРА-СКИ» и системой мониторинга установлены на Калининградской ТЭЦ-2. Опыт эксплуатации «ЭКРА-СКИ» – положительный. Получен сертификат соответствия требованиям нормативных документов. В 2011 году планируется поставка шести систем «ЭКРА-СКИ» для объектов Нижнекамской ГЭС, Курской АЭС и Северо-Западной ТЭЦ-2, а также аттестация системы «ЭКРА-СКИ» для применения на объектах ОАО «ФСК ЕЭС».

Таблица 2. Основные параметры «ЭКРА-СКИ»

№	Наименование параметра	Величина
1	Напряжение питания, В	=170...275
2	Потребляемая мощность, Вт системы датчика дифференциального тока	20 1
3	Напряжение контролируемой сети постоянного тока, В	=220 <sup>+10%</sup> <sub>-20%</sub>
4	Диапазон определяемого сопротивления изоляции сети, кОм	1...1000
5	Максимальная емкость контролируемой сети, не более, мкФ	200
6	Предельное селективно-определяемое снижение сопротивления изоляции присоединения, не более, кОм	100
7	Погрешность определения сопротивления изоляции полюсов сети в диапазоне: 1...100 кОм 100...1000 кОм	5% 10%
8	Число автоматически контролируемых присоединений, не более, шт.	255
9	Количество уставок величин сопротивлений изоляций полюсов	2
10	Количество уставок величин сопротивлений изоляций присоединений	2
11	Диапазон задаваемых сопротивлений изоляций уставок, кОм	20...100
12	Время цикла контроля сопротивлений полюсов сети, не более, сек.	8
13	Время цикла измерения сопротивлений всех присоединений, не более, сек.	20
14	Амплитуда напряжения смещения нейтрали в режиме измерения сопротивлений присоединений, не более, В	15
15	Диаметр окна датчика дифференциального тока присоединения, мм	25, 40, 70

**Выводы:**

1. Предложено устройство контроля сопротивлений изоляции присоединений и сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ», позволяющее совместную работу со стандартной схемой контроля сопротивления изоляции СОПТ и не вызывающее ложную работу устройств РЗА.
2. Опыт эксплуатации «ЭКРА-СКИ» на ПС «Бугульма-110» и Калининградской ТЭЦ-2 в 2009-2010 гг. – положительный.
3. Предложенная система контроля изоляции и автоматического поиска замыканий на землю имеет связь с АСУ ТП, обеспечивая мониторинг сети и архив событий.
4. Технические характеристики системы «ЭКРА-СКИ» удовлетворяют всем современным требованиям.

**Литература:**

1. Электротехнический справочник. В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии. 8-е изд., исп. и доп.-М.: Изд. МЭИ, 2002.-964с.
2. Патент РФ №2381513.МПК G01R27/18. Способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети постоянного тока с изолированной нейтралью, устройство для его осуществления и дифференциальный датчик для этого устройства /Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Опуб.10.02.2010 (приоритет от 16.07.2008).