

**Авторы:**

Безденежных М.Н.,  
к.т.н. Дони Н.А.,  
Кошельков И.А.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия,  
Рыжов Э.П.,  
к.т.н. Шалимов А.С.,  
ООО «НПП «Динамика»,  
г. Чебоксары, Россия.

Bezdenezhnyh M.N.,  
Ph.D. Doni N.A.,  
Koshelkov I.A.,  
«EKRA» RPE Ltd.,  
Cheboksary, Russia,  
Ryzov E.P.,  
Ph.D. Shalimov A.S.,  
NPP «Dynamika»,  
Cheboksary, Russia.

# АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ИЗДАТЕЛЕЙ SV-ПОТОКОВ МЭК 61850-9-2

## ANALYSIS OF THE OPERATION OF RELAY PROTECTION IN THE FAILURE CONDITIONS OF SV-PUBLISHERS IEC 61850-9-2

Аннотация: рассматриваются виды резервирования входных каналов интеллектуальных электронных устройств релейной защиты и автоматики (подписчиков SV-потоков), особенности реализации алгоритмов переключения на сигналы резервных издателей. Предлагаются технические решения для испытаний функции резервирования подписчиков SV-потоков при неисправностях издателей - электронных блоков цифровых измерительных трансформаторов или преобразователей аналоговых сигналов.

Ключевые слова: релейная защита, МЭК 61850, шина процесса, тестирование, резервирование издателей SV.

**Abstract:** this paper considered the types of redundancy of input channels of intelligent electronic devices of relay protection and automation (SV-subscribers), features of implementation of algorithms for switching to backup publisher's signals. Technical solutions are proposed for testing the backup function of SV-subscribers in case of failures of publishers - electronic units of digital measuring transformers or analog merging units.

**Keywords:** relay protection, IEC 61850, process bus, protection testing, backup of SV-publishers.

### Введение

Вторичные системы высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) на основе II и III архитектуры используют шину процесса – локально-вычислительную сеть (ЛВС), объединяющую устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) и устройства сопряжения с объектом. ЛВС обеспечивает трафик данных шины процесса по протоколу GOOSE (МЭК 61850-8-1 [1]) и SV (МЭК 61850-9-2 [2]). Передача аналоговой информации от первичных измерительных преобразователей и дискретных сигналов между устройствами РЗА и коммутационными аппаратами через шину процесса осуществляется с использованием кадров в формате Ethernet, образующих потоки данных.

Проектные решения для ВАПС II и III архитектур предусматривают дублирование сигналов (GOOSE-сообщения и SV-потоки) для устройств уровня присоединения от независимых источников (издателей) с целью обеспечения надёжного срабатывания при отказе любого из элементов системы РЗА ВАПС. Указанное дублирование аналоговых сигналов (передаваемых в SV-потоке) в устройстве РЗА не типично для традиционного подхода к построению вторичных систем подстанций.

В настоящее время отсутствует нормативная документация, регламентирующая

поведение элементов системы РЗА в случае пропадания сетевых пакетов или изменения качества или других сетевых параметров SV-потока (GOOSE-сообщения), на который подписано одно или несколько интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ). Для исключения указанных ситуаций, которые могут привести к возможности неправильного действия функций защиты и автоматики, целесообразно выполнять сигнализацию и перевод функций РЗА на другой (резервный) издатель, аналоговые измерения или дискретные события которого являются актуальными.

Использование сетевой технологии передачи аналоговых сигналов (Sampled Values) в III архитектуре ВАПС приводит к дополнительному увеличению времени действия защит на 3 мс [3]. При различных сетевых коллизиях в ЛВС (коммутаторы, серверы времени и т.д.) и в зависимости от способа реализации специальных алгоритмов, принятых разработчиком ИЭУ, время задержки отключения от РЗА при нестационарном аварийном режиме энергосистемы может увеличиваться до существенных значений.

Оценка работоспособности и устойчивости ИЭУ РЗА требует дополнительного объёма испытаний, разработки методов

и технических средств для тестирования функции резервирования устройствами уровня присоединения дублируемых GOOSE-сообщений и SV-поток, формируемых ИЭУ уровня процесса, а также соответствующих нормативно-технических документов для заводов-изготовителей и эксплуатирующих организаций.

### Виды резервирования SV-поток для РЗА ВАПС III архитектуры

В источнике [3] предлагается различать следующие виды резервирования SV-поток:

- сетевое;
- аппаратное;
- схемное (холодное);
- бесшовное (горячее).

Сетевое резервирование обеспечивается использованием двух независимых физических каналов связи, соответствующего сетевого оборудования и протоколов резервирования PRP (Parallel Redundancy Protocol) или HSR (High-availability Seamless Redundancy) стандарта МЭК 62439-3 [4]. Дублирование каналов передачи SV-поток и сетевых коммутаторов шины процесса (для ЛВС с протоколом PRP) ВАПС не обеспечивает резервирование устройств-издателей SV, которые остаются возможной точкой отказа системы РЗА ВАПС. В ряде случаев выход из строя такого издателя SV – электронного блока цифрового измерительного трансформатора (ЦИТ) или преобразователя аналоговых сигналов (ПАС) – может привести к длительной блокировке некоторых функций одновременно в нескольких устройствах РЗА.

Аппаратное резервирование предполагает подписку ИЭУ на SV-поток от разных измерительных или преобразовательных устройств-издателей, расположенных в одной точке измерения (рис. 1). Устройство-подписчик (ИЭУ РЗА) в этом случае принимает сразу два потока из одной точки первичной сети. При реализации аппаратного резервирования появляется возможность реализации холодного и горячего резервирования.

Схемное (холодное) резервирование выполня-

ет функцию переключения подписки ИЭУ РЗА на SV-поток от разных устройств-издателей (базовых и альтернативных), расположенных в разных точках измерения (например, от ПАС измерительных трансформаторов, установленных на разных элементах схемы ВАПС), рис. 1. Переключение на устройства-издатели SV-поток со схемным резервированием выполняется оперативно, с контролем состояния коммутационных аппаратов, соединяющих между собой точки подключения устройств-издателей альтернативных SV-поток в первичной схеме. Количество альтернативных SV-поток определяется проектом ВАПС.

Горячее (бесшовное) резервирование SV-поток обеспечивается при одновременной обработке в ИЭУ РЗА SV-поток от двух издателей (основного и резервного), например, двух устройств ПАС одного класса точности, подключенных к одному физическому измерительному устройству (трансформатору тока или напряжения), формирующих два независимых SV-поток с разными коммуникационными параметрами (destination/source MAC-адрес, svID, APPID). При этом, в каждый момент времени, для реализации функций релейной защиты используются данные из одного потока, имеющего (в общем случае) лучшие параметры качества (quality), рис. 2. При одинаковом качестве двух потоков приоритет имеет основной поток. Примеры организации холодного и горячего резервирования SV-поток ВАПС приведены в источнике [3].

При обеспечении горячего резервирования ИЭУ РЗА принимает и обрабатывает пакеты SV-поток от основного и резервного источников с проверкой критериев исправности издателя (и канала передачи данных)

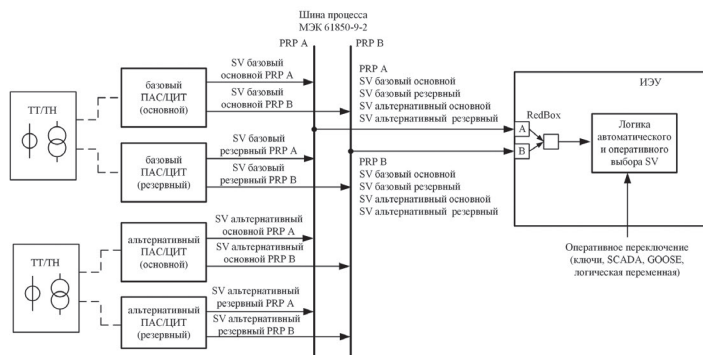


Рис. 1. Виды резервирования издателей SV для ИЭУ РЗА



**Безденежных Михаил Николаевич**

В 2011 г. окончил кафедру вычислительной техники факультета информатики и вычислительной техники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Ведущий инженер-программист отдела СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



**Дони Николай Анатольевич**

В 1969 г. окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1981 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 150 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки электроэнергетических сигналов. Директор по науке - заведующий отделом СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



**Кошельков Иван Александрович**

В 2010 г. окончил кафедру электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Магистр техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Заместитель заведующего отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



**Рыков Эдуард Петрович**

В 1995 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Управление и информатика в технических системах». Начальник отдела перспективных программных разработок ООО «НПП «Динамика».

```

IEC61850 Sampled Values
  APPID: 0x4000
  Length: 101
  > Reserved 1: 0x8000 (32768), Simulated
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  > savPdu
  noASDU: 1
  seqASDU: 1 item
  > ASDU
  svID: SV1
  smpCnt: 0
  confRev: 1
  smpSynch: global (2)
  > PhsMeas1
  value: 0
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: -244949
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: 244949
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: 0
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: 0
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: -7103520
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: 7103520
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  value: 0
  > quality: 0x00000000, validity: good, source: process
  
```

Рис. 2. Фрагмент Ethernet-кадра сетевого пакета SV

и в случае необходимости осуществляет замену сетевого пакета с цифровыми отсчетами на резервный, не оказывая влияния на работу непосредственно функций РЗА.

Для подачи цифровых отсчетов на входы алгоритмов измерительных органов для РЗА автоматически выбирается лучший поток, переход на который осуществляется бесшовно, т.е. без блокировки функций РЗА (время переключения равно нулю). В случае отсутствия базового резервного потока или в случае, когда его качество не позволяет считать его пригодным, – формируется сигнализация ИЭУ о неисправности измерительных цепей МЭК 61850-9-2 и, возможно, блокирование соответствующих функций РЗА.

### Критерии переключения ИЭУ РЗА на резервный SV-поток при горячем резервировании

Основным идентификатором качества сигнала в SV-поток является показатель (флаг) validity (достоверность) атрибута quality (качество). Данный атрибут отражает признак достоверности и может иметь значения:

- good (хороший): сигнал достоверный и устанавливается издателем в случае, если в работе источника получаемой информации не обнаружено каких-либо неисправностей;
- invalid (недействительный): недостоверность сигнала означает, что обнаружена неисправность в работе источника дан-

ных, выдаваемая информация неверна и ее нельзя использовать;

- questionable (сомнительный): признак условной достоверности выставляется в том случае, если функция самодиагностики обнаруживает ненормальное поведение источника данных, хотя сама передаваемая информация может оставаться актуальной.

Примером смены состояния флага качества является работа функции блокировки при неисправностях (БНН) во вторичных цепях измерительного трансформатора напряжения (ТН), встроенной в ПАС, которая управляет состоянием флагов качества передаваемых значений напряжения [5]. При срабатывании БНН в соответствующем SV-поток формируются флаги: q.validity = invalid, q.detailQual.failure = true, q.detailQual.inconsistent = true. Описание битов качества SV-потока приведено в табл. 1 [2].

Таблица 1. Данные качества SV

Флаг и атрибуты качества	Значение
validity (достоверность)	good (значение достоверно)
	invalid (значение недостоверно)
	questionable (условно достоверно)
detailQual (детализация качества значения)	overflow (переполнение – значение занимает больше памяти, чем отведено)
	outOfRange (выход за пределы)
	badReference (ошибка калибровки)
	oscillatory (дребезг контактов)
	failure (ошибка устройства)
	oldData (устаревание информации)
	inconsistency (противоречивость)
	inaccurate (несоответствие)
source (источник)	process (реальное устройство)
	substituted (эмулятор)
	test (бит теста)
	operatorBlocked (блокировка оператором – прекращение обновления передаваемых данных)
	derived (данные расчетные, не измеренные)

Критериями исправности принимаемых и обрабатываемых в ИЭУ РЗА SV-потоков являются:

- непрерывность – отсутствие потери подряд двух и более ASDU (в одном или двух сетевых пакетах), перемешивание или смещение относительно 1PPS сетевых пакетов с выходом за пределы буфера компенсации сетевых задержек и других сетевых коллизий [6, 7];
- достоверность – значение полей (битов) качества всех измерительных каналов (тока или напряжения) соответствует «good»;

- синхронность – состояние флага синхронизации равно 2 (global) или в ряде случаев – 1 (local);

- режим ИЭУ – соответствие битов тестирования SV-потока режиму работы ИЭУ РЗА.

При восстановлении характеристик SV-потока основного издателя ИЭУ РЗА через выдержку времени, величина которой определяется требованиями к горячему резервированию, автоматически переключается на основной поток.

Важно понимать, что механизм переключения между основным и резервным потоками не анализирует значения аналоговых сигналов в пакетах SV. Необходимым условием правильной работы бесшовного резервирования является полная совместимость двух потоков, т.е. полная взаимозаменяемость выборок с одинаковым полем `smrCnt`. Отсчёты должны совпадать с точностью до пренебрежимо малой погрешности. Иными словами, если два издателя маркируют свои потоки как полностью корректные, то значения в них должны совпадать. На приведённых ниже рисунках аналоговые значения не совпадают только для наглядности отображения перехода с одного потока на другой. В реальной эксплуатации синусоиды основного и резервного потоков должны продолжать друг друга, либо же поток должен быть отмечен как не синхронный, с плохим качеством отсчётов и т.п.

Следует отметить, что изготовители ИЭУ РЗА могут использовать разные алгоритмы реализации функций горячего резервирования. При этом способы проверки их функционирования могут быть типовыми.

### Тестирование функции резервирования издателей SV-потоков

Проверка функции резервирования может объединяться с проверкой функционирования алгоритмов ИЭУ РЗА для оценки их поведения (быстродействия, селективности) при наложении событий аварии в электроэнергетической системе (ЭЭС) и неисправности издателя SV. Для проведения подобных испытаний актуально применение программно-аппаратных комплексов (ПАК) для проверки устройств РЗА с поддержкой МЭК 61850-9-2.

Требования к функционалу подобно ПАК включают возможность динамического изменения электрических (ампли-

туда, фаза, частоты и их производные для сигналов в каналах тока и напряжения) и сетевых параметров (структура, порядок следования и содержимое полей сетевых пакетов SV) в заданных сценарием испытательных комбинациях. Кроме того, ПАК должен поддерживать глобальную синхронизацию по протоколу точного времени RTP или от спутниковых сигналов ГЛОНАСС.

Примером подобного инструмента является ПАК на основе РЕТОМ-61850 [8] и специальное ПО «Генератор SV-потоков МЭК 61850». Применение ПАК для проверки сетевого резервирования по протоколу PRP рассмотрено в источнике [9].

Для испытаний функции горячего резервирования SV-потоков ПАК выполняет имитацию необходимых издателей ИЭУ РЗА (рис. 3). Программное обеспечение ПАК формирует последовательности потоков данных, имитирующих режимы в ЭЭС и ЛВС. Аналоговые сигналы набора данных каналов тока и напряжения SV-потока для каждой последовательности, задаются в формате:

$$X(t) = \sqrt{2}X \sin(2\pi f(t - t_{\Pi}) + \varphi),$$

где  $X$  – действующее значение сигнала тока или напряжения;

$f$  – частота сигнала;

$\varphi$  – фаза сигнала,

$t_{\Pi}$  – время смещения сигнала относительно начала последовательности.

Значения  $X$ ,  $f$ ,  $\varphi$  и  $t_{\Pi}$  формируются индивидуально для каждой последовательности SV-потока.

Алгоритм испытаний с использованием ПАК в общем случае включает генерацию последовательностей SV-потоков, содержащих:

- нормальный режим (в ЭЭС, ЛВС и издателях SV);

- режим аварии в ЭЭС с наложением на процесс короткого замыкания (КЗ) события отказа (неисправности) издателя основного SV-потока и фиксацией времён срабатывания функций (измерительных органов) РЗА.

Режим неисправности издателя зависит от сценария испытаний: отключение в передаче SV-потока, установка флагов недостоверных данных для передаваемых сигналов и т.д. Осциллограммы сценариев испытаний с паузой в передаче SV-потока и переключением флагов качества, полученные при помощи захвата сетевого трафика, приведены на рис. 4, 5.



Шалимов

Александр Станиславович

В 2005 г. окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра электрических и электронных аппаратов. В 2022 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и технических средств проверки и настройки релейной защиты».

Начальник отдела релейной защиты и автоматики ООО «НПП «Динамика».

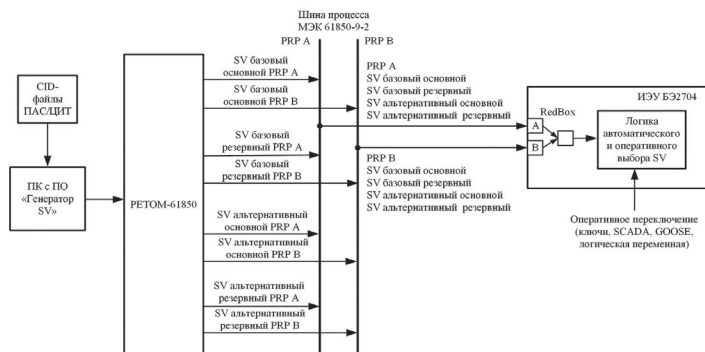


Рис. 3. Схема испытаний функции резервирования издателей SV

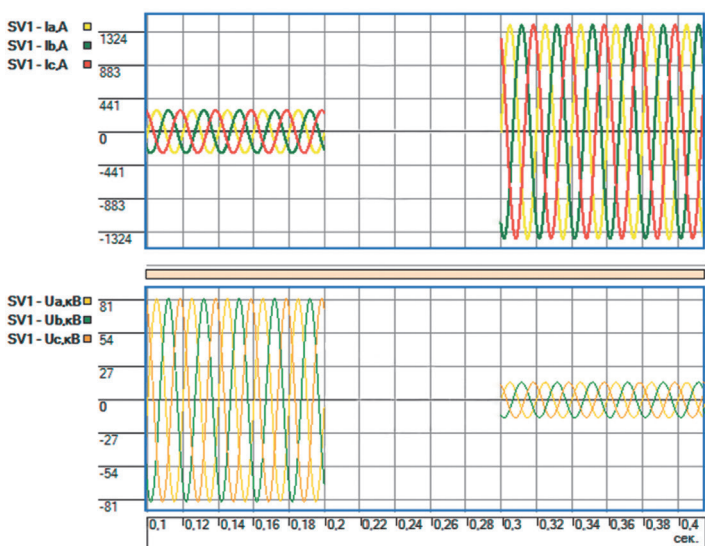


Рис. 4. Осциллограмма электрических параметров процесса с перерывом передачи SV-потока

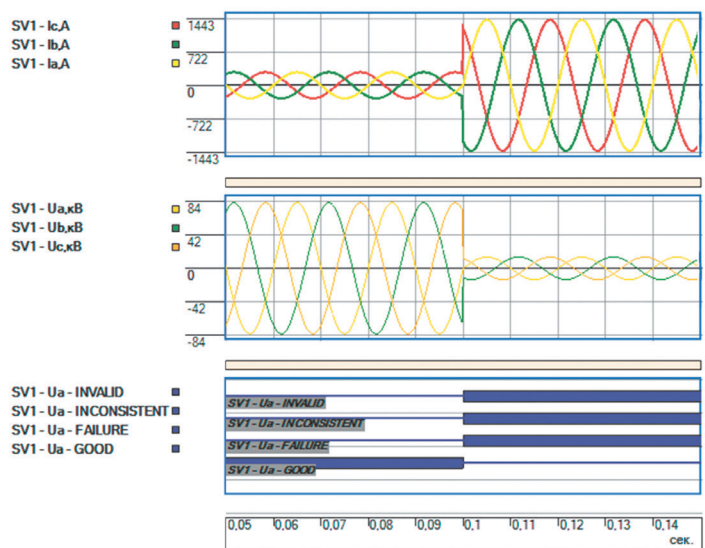


Рис. 5. Осциллограмма электрических параметров процесса с изменением качества в каналах SV-потока

Для оценки восстановления приёма основного SV-потока выполняется следующий алгоритм:

- нормальный режим (в ЭЭС, ЛВС и издателей SV);
- режим отключения (недостовренности данных) основного и резервного SV-потоков с фиксацией сигнала неисправности шины процесса;
- восстановление параметров основного (или резервного) SV-потока, фиксация восстановления аналоговых измерений и снятия сигнала неисправности в ИЭУ.

На рис. 6 приведены фрагменты настроек ПАК для проверки функции резервирования при пропадании на заданное время основного SV-потока, установка недоверного качества в аналоговых каналах, нарушении структуры сетевого пакета и коллизий в передаваемых SV-потоках. Указанные настройки могут применяться к каждому SV-потоку в любой из заданных последовательностей.

Рассмотрим проверку функционирования горячего резервирования SV с использованием ПАК для ИЭУ резервной защиты автотрансформатора типа БЭ2704v071 (ООО НПП «ЭКРА»). Устройство БЭ2704v071 подписано на два базовых SV потока МЭК61850-9-2LE – основной и резервный.

На рис. 7 приведена осциллограмма результата испытаний для сценария, когда к ИЭУ подводится изначально только один (базовый основной) SV-поток. ПАК имитирует режим SV из трёх последовательностей, где в первом режиме имитируется нормальный режим (в ЭЭС и в ЛВС), во втором на 180 мс выполняется отключение базового SV-потока, в третьем режиме – восстановление передачи SV-потока с аналоговыми сигналами, соответствующими трёхфазному КЗ в ЭЭС. В этом случае, при отсутствии базового резервного потока, отключение SV-потока (либо недоверность в данных качества и т.п.) приводит к установке специальным алгоритмом ИЭУ логического сигнала «Неисправность шины 9-2» равным «1» и блокировке работы функций РЗА. После восстановления передачи (нормальных параметров) SV-потока с аналоговыми сигналами, соответствующими КЗ в ЭЭС, происходит возврат функции блокирования ИЭУ (значение сигнала «Неисправность шины 9-2» равно «0»), который приводит к суммарной задержке в срабатывании измерительных органов РЗА, приблизительно на 100 мс (рис. 7).

При подведении к ИЭУ БЭ2704v071 основного и резервного базовых SV-потоков обеспечивается условие функционирования горячего резервирования. Соответственно, при аналогичном аварийном сценарии происходит бесшовное переключение на измерения резервного потока, отсутствует блокировка ИЭУ и время срабатывания измери-

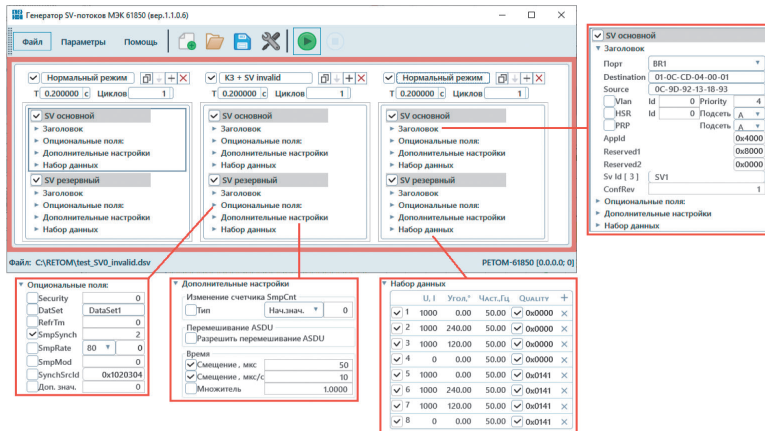


Рис. 6. Настройки условий проверки функции резервирования SV

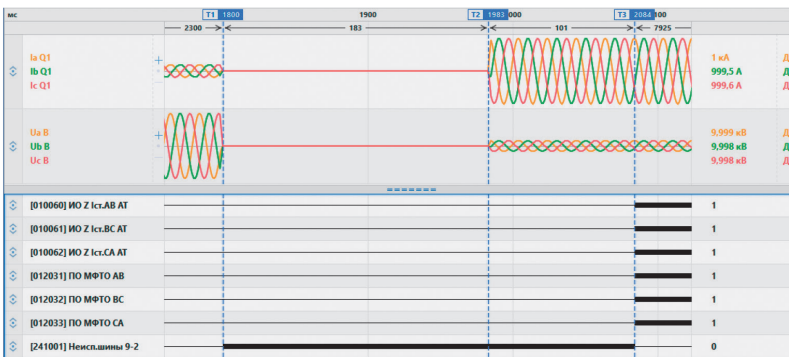


Рис. 7. Осциллограмма ИЭУ РЗА при КЗ без горячего резервирования

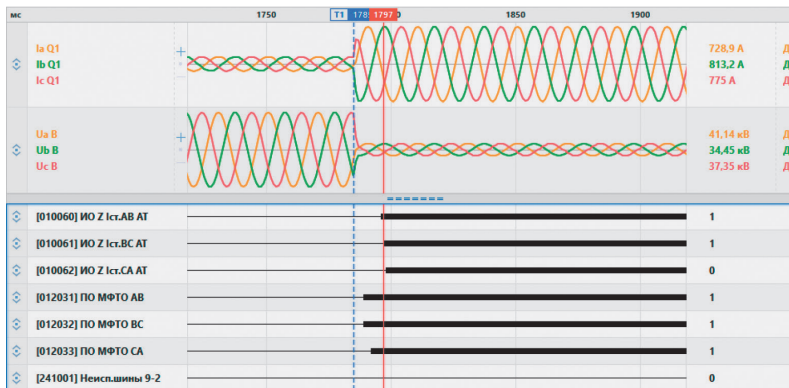


Рис. 8. Осциллограмма ИЭУ РЗА при КЗ с работой функции горячего резервирования

тельных органов РЗА соответствует техническим данными устройства.

Таким образом, обеспечение горячего резервирования, совместно с сетевым, позволяет обеспечить надёжность РЗА с нулевым временем задержки отключения КЗ при отказе одного, а в ряде случаев и нескольких элементов вторичной системы ВАПС. Рассмотренные средства проверки и примеры сценариев испытаний могут адаптироваться для тестирования поведения ИЭУ-подписчиков SV с учётом особенностей

реализации проектов ВАПС III архитектуры и расширяться на основе требований и опыта эксплуатации и технических данных ИЭУ РЗА.

**Выводы**

1. Предложенные технические решения по имитации неисправностей в издателях SV-потоков могут стать основой для разработки требований к методикам испытаний ИЭУ в части проверки резервирования SV-потоков.

2. Динамические испытания функции горячего резервирования SV-подписчика могут применяться при аттестации ИЭУ РЗА при оценке правильности обработки данных SV-потока и устойчивости функционирования ИЭУ при некорректных данных. Рассмотренный инструмент генерации SV-потоков может применяться для ряда проверок при приёмке ИЭУ РЗА из наладки, при эксплуатационных и послеаварийных проверках.

**Литература:**

1. Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3 International standard IEC 61850-8-1 Edition 2.02011-06.
2. IEC 61850-9-2. Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Edition 2.1. / International Electrotechnical Commission. – 2020.
3. Безденежных М.Н. Резервирование SV-потоков для целей РЗА / М.Н. Безденежных, Н.А. Дони, И.А. Кошельков // Релейщик. – 2023. – № 3. – С. 44-47.
4. IEC 62439-3:2021. Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). - Edition 4.0 / International Electrotechnical Commission. – 2021.
5. Дони Н.А. Особенности испытаний встроенной блокировки при неисправностях в цепях напряжения преобразователя аналоговых сигналов IEC 61850-9-2LE / Н.А. Дони, И.А. Кошельков, А.С. Шалимов // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 2 (39). – С. 26-29.
6. Безденежных М.Н. Особенности тестирования цифровой дифференциальной защиты шин 110-750 кВ на основе протокола IEC 61850-9-2LE / М.Н. Безденежных, Н.А. Дони, Е.П. Егоров, И.А. Кошельков, А.А. Петров, Н.А. Тойдеряков, А.С. Шалимов // Релейная защита и автоматизация. – 2018. – № 2 (31). – С. 41-47.
7. Дони Н.А. Особенности совместного использования устройств релейной защиты на основе стандарта IEC 61850-9-2LE и защит с традиционными входными аналоговыми цепями / Н.А. Дони // Релейщик. – №1. – 2015. – С. 40.
8. Шалимов А.С. Опыт периодических испытаний цифровых защит с поддержкой IEC 61850-8-1 и IEC 61850-9-2 / Шалимов А.С. // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3 (44). – С. 100-103.
9. Рыжов Э.П. Проверка протоколов резервирования сети SV-подписчика МЭК 61850-9-2 в динамическом режиме / Э.П. Рыжов, А.С. Шалимов // В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы VII Международной научно-технической конференции. Чебоксары. – 2023. – С. 51-55.