



УДК 621.316.925.1

Авторы:
к.т.н. Атнишкин А.Б.,
Николаев И.Н.,
ООО «Релематика»,
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Atnishkin A.B.,
Nikolaev I.N.,
Relematika LLC,
Cheboksary, Russia.

Abstract: time synchronization is highly significant risk factor of Modern Highly-automated Substation and it can affect the relay protection and automation system. Major threats and potential problems related to time

Ключевые слова: МЭК 61850, SV, релейная защита и автоматика, синхронизация времени, надежность, безопасность.

synchronization subsystem is considered in this paper. Measures aimed on minimizing consequences of substation time synchronization failure are proposed, algorithmic methods of reliability improvement for relay protection and automation are developed.

Keywords: IEC 61850, SV, relay protection, automation, time synchronization, reliability, security.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЗА ПРИ НАРУШЕНИЯХ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ НА ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

DIGITAL SUBSTATION PROTECTION AND AUTOMATION FUNCTIONING IN CASE OF TIME SYNCHRONIZATION FAILURE

Аннотация: синхронизация времени для современных высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) является важным фактором, влияющим на работоспособность релейной защиты и автоматики (РЗА). В статье рассмотрены основные угрозы и потенциальные проблемы, связанные с подсистемой синхронизации времени подстанций (ПС). Предложены меры, направленные на минимизацию последствий на всех уровнях системы, разработаны алгоритмические методы обеспечения корректного поведения функций РЗА в условиях нарушения синхронизации времени на ПС.

Введение

Современные системы автоматизации электрических подстанций преимущественно выполняются на основе стандарта МЭК 61850. Это предполагает широкое использование информационных и коммуникационных технологий и создает ряд преимуществ высокоавтоматизированной или «цифровой» подстанции (ЦПС) перед традиционной, таких как совместимость оборудования разных производителей, непрерывная автоматизация процессов жизненного цикла и др.

Однако вместе с тем применяемые технологии несут с собой новые риски для объектов критической инфраструктуры. Информационная безопасность, увеличение количества разнообразных компонентов системы и, как следствие, снижение ее надежности, недоступность используемых ранее комплектующих и программного обеспечения (ПО), нехватка компетенций и инструментов, а к тому же отсутствие или частое изменение нормативной базы – лишь часть вызовов, возникающих при массовом внедрении ВАПС на основе МЭК 61850 [1].

Применение протокола Sampled Values [2] для передачи измерений токов и напряжений на ЦПС сопряжено с необходимостью выполнять высокоточную (как правило, 1 мкс) синхронизацию времени интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) источников SV-потоков. С помощью синхронизации обеспечивается единство времени формирования отсчетов измерений источниками SV-потоков, распределенными по объекту, что позволяет использовать измерения совместно в расчетах в функциях РЗА. При неисправности синхронизации времени измерения от разных источников SV «расходятся» и становятся непригодными для использования в измерительных органах РЗА с несколькими подводимыми величинами от разных источников [3, 4]. На первоначальных этапах внедрения РЗА с SV-потоками были случаи неправильной работы по этой причине. Восприимчивость современных систем РЗА к неисправностям синхронизации времени, т.е. к несинхронным SV-потокам, также зачастую характеризуется полной блокировкой, ограниченным временем функционирования в подобных условиях или не-



корректным поведением. Фактически это делает систему синхронизации времени критически важной для функционирования всей РЗА на ПС.

Цель статьи заключается в анализе возможностей сохранения в работе системы РЗА при нарушении синхронизации времени на ПС, реализации этих возможностей в ИЭУ РЗА и проверке в реальных условиях нарушения синхронизации времени.

Безопасность и надежность системы синхронизации

Первоначально для синхронизации ИЭУ, публикующих SV, использовалась 1PPS синхронизация. Современным стандартом является синхронизация устройств от сервера времени по протоколу PTP.

В нормальном режиме работы сервер времени синхронизируется с глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) и выступает ведущим устройством, предоставляющим глобальную синхронизацию для остальных устройств на ПС. В случае потери сигнала от ГНСС по любым причинам, будь то ухудшение условий приема сигнала, поломка антенны или умышленное подавление сигнала, сервер переходит в режим удержания времени за счет внутреннего тактового генератора. Конечные ИЭУ также способны удерживать синхронизацию времени, но их время удержания значительно меньше. По истечении времени удержания целевая точность синхронизации более не обеспечивается, и сервер времени начинает выступать в качестве локального источника синхронизации времени. Время работы в таком режиме может быть не ограничено. Наконец, крайняя степень деградации синхронизации времени характеризуется отсутствием внешних источников (серверов) синхронизации времени для конечных ИЭУ. Это может быть неисправность сервера времени, потеря его питания, нарушение связи с коммуникационной сетью или иная причина. Важно отметить, что деградация системы синхронизации может быть связана не только с ее недостаточной надежностью (как правило, резервирование нивелирует этот фактор), но также с ее безопасностью.

Для цифровой системы синхронизации, использующей коммуникационную сеть и слабые ГНСС-сигналы, имеется целый класс угроз информационной безопасности.

Их можно разделить на два основных вида:

- 1) воздействие на уровне приема/передачи сигналов со спутников;
- 2) воздействие в сети связи в условиях существования используемых протоколов связи.

Одна из актуальных проблем для систем использующих ГНСС – надежный прием сигналов от спутников в условиях помех (рис. 1). На рынке доступны широкому кругу лиц устройства, способные нарушить функционирование приемника сигналов ГНСС. Если такое устройство разместить скрытно на небольшом удалении от ПС, даже за периметром ее безопасности, оно может повлиять на работу системы синхронизации и его обнаружение будет требовать определенных усилий. Однако такая ситуация диагностируема системой, и сервера синхронизации смогут перейти в автономный режим работы.

Использование же профессиональных систем с возможностью имитировать навигационное поле спутников с учетом актуальной группировки позволяет злоумышленнику управлять ходом часов, плавно замедляя или ускоряя его, и в этом случае система синхронизации ПС не способна выявить, что ее «обманывают». Увод времени всего на несколько миллисекунд может привести к ложной работе устройств РЗА.

Единственным на сегодня методом борьбы с такими угрозами может быть применение специальных интеллектуальных систем приема сигналов ГНСС, позволяющих выделить ложные сигналы и обеспечить надежный прием сигналов синхронизации даже в условиях постановки сильных помех.

Менее актуальная, но также возможная на практике проблема – воздействие злоумышленником на процессы, протекающие

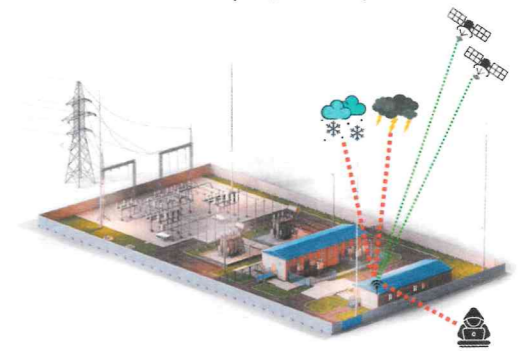


Рис. 1. Нарушение приема сигнала синхронизации от ГНСС



Атнишкин Александр Борисович
В 2016 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. В 2019 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора». Ведущий эксперт ООО «Релематика».



Николаев Иван Николаевич
В 2006 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. Директор Департамента информационных технологий ООО «Релематика».

в локальной вычислительной сети (ЛВС) ПС, связанные с синхронизацией времени. Часть из этих воздействий может быть нивелирована или выявлена наложенными средствами защиты ЛВС. Однако выявление подобного воздействия самой системой синхронизации не всегда представляется возможным [5].

Анализ условий для функционирования РЗА

Развитие признаков синхронизации измерений в МЭК 61850-9-2.

Релиз редакции 1.0 стандарта МЭК 61850-9-2 состоялся в 2004 г. На тот момент стандартом предусматривалось только два значения атрибута `smpSynch` для состояния синхронизации измерений в пакете SV. Это «true» или «false», означающие наличие или отсутствие синхронизации измерений от внешнего источника. Рекомендаций по способу синхронизации стандарт не давал. С точки зрения условий для функционирования РЗА наличие синхронизации SV-потоков от разных источников делает возможным совместное использование их измерений в расчетах.

Вышедшее затем практическое руководство по применению МЭК 61850-9-2 от UCA International Users Group, более известное как 9-2 LE [6], в котором был введен целый ряд ограничений применения стандарта и жестко определен формат пакета передачи, создало условия функциональной совместимости устройств разных производителей, придав сильный импульс распространению SV. Спецификация была выполнена на основе первой редакции, и атрибут `smpSynch` в ней аналогичный. Однако в ревизии 3.0 практического руководства от 2005 г. он получает модификацию. Дополнительные значения «1» и «2» уточняют тип синхронизации – от локального источника или от глобального. Помимо прочего в спецификации определяется способ синхронизации времени – 1PPS по оптическому волокну. А поскольку источник 1PPS един для всех ИЭУ на ПС, то трех `smpSynch` значений было достаточно для расширения возможностей функционирования РЗА. При синхронизации от локального источника `smpSynch=1` по-прежнему сохранялись условия функционирования всех приложений за исключением тех, что используют удаленные измерения с иным источником синхронизации (например, дифференциальная защита линии). На текущий момент 1PPS синхронизация, как и редакция 1.0, свою актуальность утратила.

Дальнейшая эволюция признака синхронизации измерений SV происходит в редакции 2.0 стандарта 2011 г. К тому времени инструментальная синхронизация времени PTP Version 2 (МЭК 61588:2009) [7] как более удобный способ, использующий коммуникационную сеть ЦПС, начинает вытеснять 1PPS. Но физическое резервирование серверов времени на ПС и допустимость их подключения в режиме SAN (Single Attached

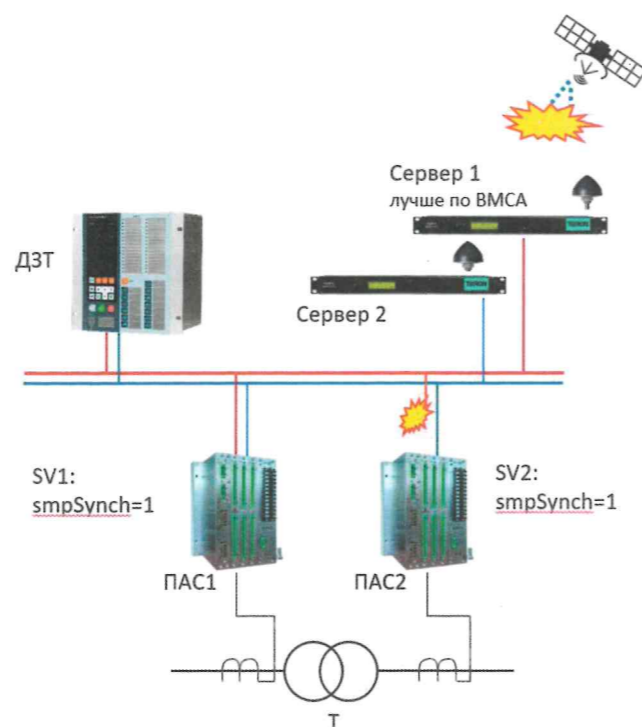


Рис. 2. Образование «островков» локальной синхронизации ПАС

Node) к обеим PRP-подсетям приводят к увеличению количества источников времени на ПС – теперь их больше одного. А значит, признак локальной синхронизации `smpSynch=1` у измерений от разных ИЭУ на ПС более не гарантирует их синхронность, ограничивая возможности сохранения в работе функций РЗА. На этот вызов стандарт отвечает выделением диапазона `smpSynch=5..254` для использования в качестве идентификатора источника времени в случае локальной синхронизации, формально предоставляя тем самым условия сохранения в работе приложений, использующих измерения, синхронизированные от одного источника.

На рис. 2 показан пример образования «островков» локальной синхронизации с SAN-подключением двух серверов времени в разные PRP-подсети, по причине неисправности одной из линий связи с шиной процесса устройства ПАС2. Для ПАС1 источником синхронизации выступает Сервер 1, т.к. в рассматриваемом примере он лучше по алгоритму выбора лучших часов (VMCA), но для ПАС2 остается доступен только Сервер 2. При DAN-подключении серверов времени ситуация возникновения «островков» локальной синхронизации также возможна, но уже при неисправности одновременно двух линий связи.

Становление PTPv2 как предпочтительного способа синхронизации времени ИЭУ-публикаторов SV ознаменовалось включением профиля Precision Time Protocol

profile for power utility automation, или как часто его называют Utility profile, канонического стандарта PTP в серию стандартов МЭК 61850 в виде отдельной части 9-3 в 2016 году [8].

Последняя на сегодня редакция 2.1 стандарта МЭК 61850-9-2 вышла в 2020 г. В очередной раз разработчиками внесены корректировки, связанные с признаками синхронизации измерений. Впервые в части 9-2 приводится рекомендация по использованию PTP. Возможных значений `smpSynch` осталось три: «0» – отсутствие внешнего источника, «1» – локальная синхронизация, «2» – глобальная синхронизация. А в дополнение в виде отдельного атрибута в пакете SV передается опциональный атрибут `gmIdentity`, отражающий идентификатор часов `grandmasterIdentity` из канонического PTP, от которых синхронизируется ИЭУ-публикатор. Таким образом, изменения в этой части относительно редакции 2.0 носят оптимизационный характер, сохраняя возможности для функционирования РЗА.

Требования к синхронизации измерений для функций РЗА.

Синхронизация SV-потоков является необходимым условием для использования их измерений в совместных расчетах. Отсутствие синхронизации будет приводить к погрешности. Соответственно, возможность выполнения функции РЗА при неисправностях синхронизации времени определяется наличием подобных расчетов.

Выделяются три группы функций РЗА в зависимости от их требований к синхронизации измерений SV:

- 1) требующие глобальной синхронизации SV;
- 2) требующие глобальной синхронизации SV либо локальной синхронизации от единого источника;
- 3) допускающие любой тип синхронизации, в том числе отсутствие внешней синхронизации.

Принадлежность конкретной функции РЗА к группе определяется ее типом и проектным решением ее применения. К первой группе, как правило, относятся защиты распределенных объектов, использующие удаленные измерения, синхронизированные от другой системы, например, дифференциальная защита линии без синхронизации полукомплектов. Ко второй группе относятся функции, использующие в совместных расчетах локальные измерения из разных SV-потоков, например, дифференциальная защита трансформатора, дистанционная защита линии. Функции третьей группы не содержат совместных расчетов из разных SV, к примеру, токовые защиты. Таким образом, надежная и устойчивая к угрозам безопасности в части синхронизации времени система РЗА должна характеризоваться блокировкой ее функций только по мере выявления принципиальной невозможности их выполнения. При этом отдельные функции РЗА сохраняются в работе даже в условиях полного отсутствия синхронизации.

Обработка несинхронизированных SV-потоков для функций РЗА

Пакеты и измерения при отсутствии синхронизации SV-потоков.

На полигоне ВАПС ООО «Релематика» были проведены эксперименты с нарушением синхронизации времени. Полигон ВАПС реализует полноценную цифровую систему автоматизации на основе МЭК 61850, включает все необходимые компоненты: ИЭУ всех уровней, коммутаторы, ЛВС и серверы.

Источниками SV-потоков в опытах выступали пять ИЭУ одного производителя. Для передачи аналоговых измерений использован формат SV-сообщений F4000S114U4 (совместимый с 9-2 LE), соответствующий МЭК 61869-9:2016 [9], что означает частоту дискретизации 4000 Гц, одну единицу данных в пакете (ASDU) с отсчетами 4 токов и 4 напряжений.

К измерительным каналам пяти ИЭУ, публикующих потоки SV1–SV5, подведено одинаковое напряжение $U=100$ В от ЛАТР. Изначально все SV имеют признак глобальной синхронизации `smpSynch=2`. Затем для источников, публикующих потоки SV2–SV5, была одновременно отключена PTP-синхронизация на портах коммутатора, при этом SV1 оставлен как контрольный с `smpSynch=2`. Спустя некоторое время удержания отсчеты всех пяти источников начинают расходиться между собой. Эксперимент длился 13 суток. На рис. 3 показано, как с течением времени происходил сдвиг *shift* по индексам `smpCnt` у последовательно приходящих пакетов SV2–SV5 относительно SV1. По рис. 4 можно заметить, что характеристики собственных тактовых генераторов у ИЭУ, публикующих SV, схожие и температурозависимые. Понижение температуры приводило к понижению тактовых частот генераторов у всех ИЭУ.

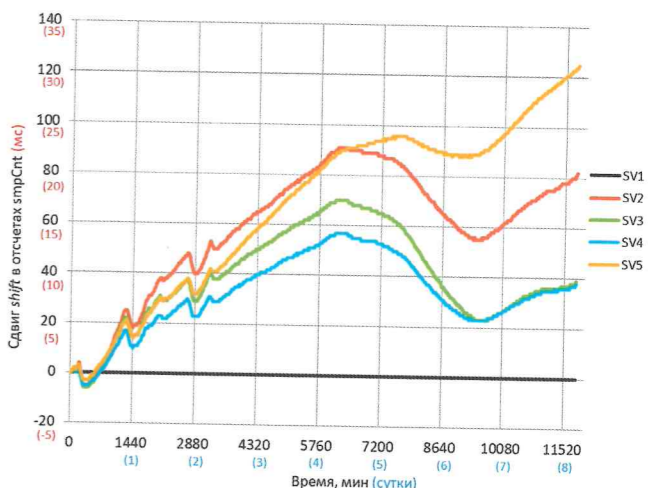


Рис. 3. Сдвиг отсчетов несинхронизированных SV-потоков относительно синхронизированного SV1

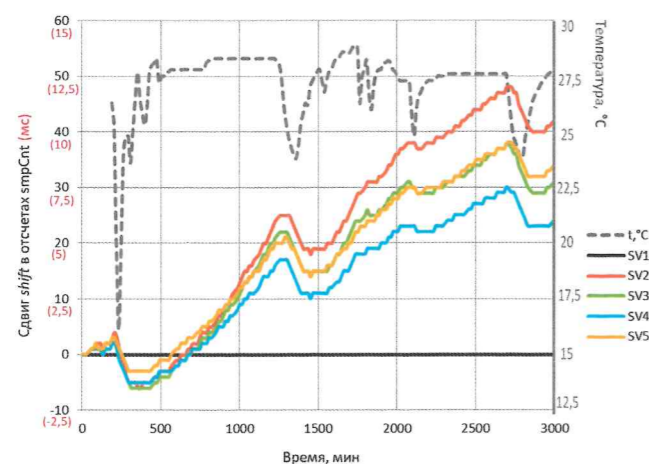


Рис. 4. Сдвиг отсчетов несинхронизированных SV-потоков относительно синхронизированного SV1 и изменение температуры окружающего воздуха

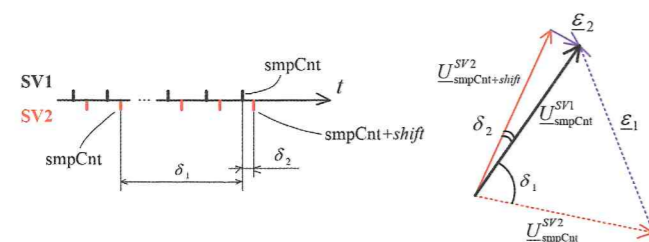


Рис. 5. Временная диаграмма пакетов SV1 и SV2 и векторная диаграмма их напряжений

На рис. 5 приведены временная диаграмма поступления пакетов SV1, SV2 и векторная диаграмма напряжений из SV1 и SV2 в режиме несинхронности потоков с образовавшимся сдвигом shift, выраженном в количестве отсчетов на частоте дискретизации SV-потока.

Для SV1 показан вектор напряжения U_{smpCnt}^{SV1} , соответствующий текущему индексу smpCnt. Для SV2 показаны два вектора: один с тем же индексом smpCnt U_{smpCnt}^{SV2} , а другой со сдвигом shift $U_{smpCnt+shift}^{SV2}$.

Формулы для фазной, амплитудной и полной погрешности измерения SV2 относительно SV1 для паке-

Таблица 1. Погрешности измерений несинхронизированного SV2 относительно синхронизированного SV1

Погрешность	Измерение SV2 относительно SV1	
	пакеты с одинаковым smpCnt	соседние пакеты со сдвигом shift по smpCnt
Фазная	$\delta_1 = shift \cdot 4,5^\circ - \delta_2$	δ_2
Амплитудная	$A_1 = 0$	$A_2 = 0$
Полная	$\varepsilon_1 = 2U \sin \frac{\delta_1}{2}$	$\varepsilon_2 = 2U \sin \frac{\delta_2}{2}$

тов с одинаковым индексом smpCnt и со сдвигом shift в индексах smpCnt приведены в табл. 1.

Малая величина δ_2 учитывает сдвиг сеток дискретизации SV1 и SV2, а также неоднотипность времен публикации и доставки пакетов SV. Фаза смещения основной гармоники для формата SV-сообщений F4000S114U4 для сдвига shift = 1 соответствует 4,5°. Амплитудная погрешность в обоих случаях нулевая, т.к. $U_{smpCnt}^{SV1} = U_{smpCnt}^{SV2} = U$. Поэтому полная погрешность обусловлена только фазной.

Обработка SV-потоков в ИЭУ РЗА

Обобщенно принцип обработки измерений SV в ИЭУ РЗА представлен на рис. 6. Буфер отсчетов обеспечивает непрерывность поступления отсчетов с измерениями в функции РЗА. МЭК 61850-5 [10] накладывает жесткие требования по времени доставки измерений (до 3 мс) для функций РЗА, поэтому задержки в буфере должны быть минимальными. Управление буфером выполняет обработчик данных, где также может выполняться фильтрация, восстановление и другая предобработка «сырых» данных.

Далее рассмотрен алгоритм трансляции синхронных отсчетов в функции РЗА по одинаковым значениям smpCnt и разработанный для ИЭУ TOP 300 адаптивный алгоритм трансляции отсчетов несинхронизированных SV.

1) Трансляция отсчетов SV с одинаковыми smpCnt.

Одновременная передача отсчетов SV в приложения при едином источнике синхронизации у входящих SV-потоков выполняется по критерию синхронности их формирования, т.е. по равенству smpCnt в пакетах SV. При этом погрешности $\delta_1, \varepsilon_1 \rightarrow 0$. В случае несинхронизированных SV-потоков продолжение работы по данному правилу приведет к ожидаемому появлению погрешностей $\delta_1, \varepsilon_1 \neq 0$. Но что категорически неприемлемо, это нарушение непрерывности передачи измерений в функции из-за превышения размера буфера отсчетов. Поэтому обработка и трансляция измерений в функции РЗА возможна только для одного SV-потока (в случае отсутствия общего источника синхронизации) или для синхронизированных между собой SV-потоков. Трансляция измерений из остальных SV прекращается, а соответствующие функции РЗА блокируются.

2) Адаптивный алгоритм трансляции отсчетов SV.

Для сохранения в работе РЗА при синхронизации источников SV от разных источников и даже в условиях



Рис. 6. Обработка SV-потоков в ИЭУ

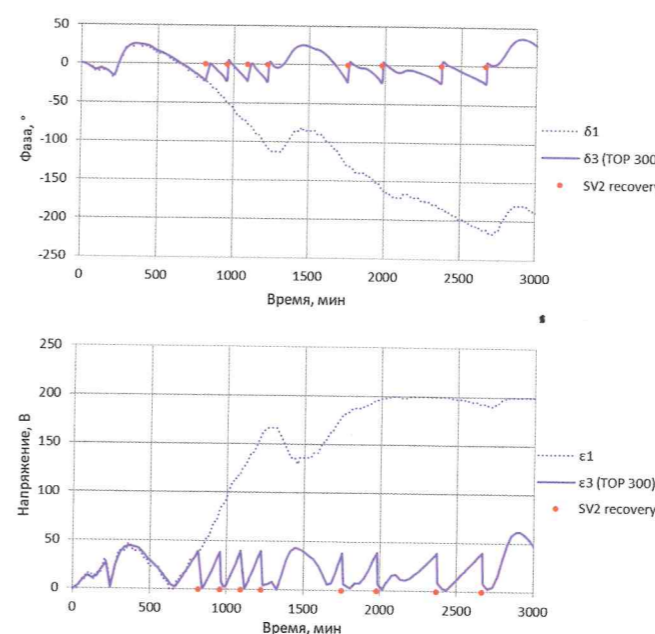


Рис. 7. Характеристики обработки несинхронизированных SV-потоков в ИЭУ TOP 300

отсутствия источников синхронизации на ПС в ИЭУ TOP 300 реализована интеллектуальная обработка несинхронизированных SV-потоков. Адаптивные алгоритмы управления буфером подстраиваются под текущие условия поступления пакетов SV, обеспечивая непрерывность трансляции измерений в приложения РЗА. Ограничений по продолжительности работы в условиях несинхронности SV нет, высокоточная синхронизация по RTP самого ИЭУ РЗА не требуется. Решение совместно с актуальным Корпоративным профилем SV ПАО «ФСК ЕЭС» [11] и спецификацией 9-2 LE. На текущий момент ИЭУ TOP 300 с поддержкой обработки несинхронизированных SV-потоков эксплуатируется на объектах электроэнергетики.

Во все время вышеописанного эксперимента ИЭУ TOP 300 выполнял прием и обработку потоков SV1-SV5 согласно адаптивному алгоритму обработки. На рис. 7 сплошной линией показаны полученные в ИЭУ РЗА фазная погрешность δ_2 и соответствующая ей полная ε_3 для измерений SV2 относительно SV1, амплитудная погрешность при этом $A_3 = 0$. Для сравнения пунктирной линией показаны те же погрешности в случае обработки несинхронизированных потоков по первому алгоритму. Точками «SV2 recovery» отмечены кратковременные на 3 мс приостановки трансляции измерений в функции РЗА, связанные с объективной необходимостью компенсации разной частоты поступления пакетов несинхронизированных SV. Они не приводят к неправильному поведению РЗА, и за 13 суток эксперимента их суммарное время составило всего 111 мс.

Выводы

Система высокоточной синхронизации времени – необходимый элемент ВАПС с SV-потоками, влияющий на работоспособность РЗА, к тому же подверженный угрозам его информационной безопасности. Для обеспечения надежности работы системы синхронизации времени необходимо применять комплекс мер: обеспечение надежного приема сигналов ГНСС, использование специальных средств контроля ЛВС. Однако, даже при реализации всех мер, для построения надежной системы РЗА ВАПС необходимо использовать возможности актуальных редакций МЭК 61850-9-2 по передаче идентификатора часов в пакетах SV, применять ИЭУ РЗА с поддержкой обработки несинхронизированных SV-потоков, а также те, которые сами не требуют непременно высокоточной синхронизации. Современные интеллектуальные устройства РЗА в составе комплекса ВАПС могут содержать дополнительные функции мониторинга и контроля входных данных из ЛВС, минимизирующие риски неправильной работы релейной защиты.

Найденное решение по обработке несинхронизированных SV-потоков внедрено в ИЭУ РЗА TOP 300 и позволяет сохранить в работе часть функций РЗА в условиях, когда SV-потоки не синхронизированы между собой. Решение проверено и успешно функционирует на объектах электроэнергетики, обеспечивая надежность системы РЗА и ее устойчивость к реализации угроз информационной безопасности через систему синхронизации времени.

Литература:

1. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Проблемы повышения киберустойчивости цифровой подстанции // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1 (34). – С. 78-83.
2. IEC 61850-9-2: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Edition 1.0, 2004-04; Edition 2.0, 2011-09; Edition 2.1, 2020-02.
3. Особенности функционирования РЗА на ЦПС III архитектуры при потере синхронизации SV-потоков / А.Б. Атнишкин, Д.В. Кержаев, Д.В. Блинов, К.С. Абрамов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2021: материалы XII междунар. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, НГТУ – 2022.
4. А. Аношин, А. Головин Синхронизация времени: слабое место ЦПС? [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/10/03/sinhronizatsiya-vremeni-slaboe-mesto-tcps/> (дата обращения: 15.08.2021)
5. S. Barreto, A. Suresh, and J. Le Boudec, «Cyber-attack on packet-based time synchronization protocols: The undetectable delay box» in Proc. IEEE Int Instrumentation and Measurement Technology, 2016.
6. Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformer using IEC 61850-9-2. Revision 2.1, 04-07-07; Revision 3.0, 05-08-25.
7. IEC 61588 / IEEE 1588TM : Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems. Edition 2.0, 2009-02.
8. IEC/IEEE 61850-9-3: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation. Edition 1.0, 2016-05.
9. IEC 61869-9: Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers. Edition 1.0 2016-04.
10. IEC 61850-5: Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models. Edition 2.0, 2013-01.
11. СТО 56947007-25.040.30.309-2020: Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС». – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.