

Функционирование РЗА при нарушениях синхронизации времени на цифровой подстанции

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 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 ПО, нехватка компетенций и инструментов, а к тому же отсутствие или частое изменение нормативной базы – лишь часть вызовов, стоящих при массовом внедрении высокоавтоматизированных подстанций на основе МЭК 61850.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МЭК 61850, SV, релейная защита и автоматика, синхронизация времени, надежность, безопасность

Авторы:
Атнйшкн А.Б.,
Ннколаев И.Н.

Применение протокола Sampled Values (МЭК 61850-9-2) для передачи измерений токов и напряжений на цифровой подстанции сопряжено с необходимостью выполнять высокоточную (как правило, 1 мкс) синхронизацию времени ИЭУ источников SV-потоков. С помощью синхронизации обеспечивается единство времени формирования отсчетов измерений источниками SV-потоков, распределенными по объекту, что позволяет использовать измерения совместно расчетах в функциях РЗА. При неисправности синхронизации времени, измерения от разных источников SV «расходятся» и их более нельзя использовать в измерительных органах РЗА с несколькими подводимыми величинами от разных источников. На первоначальных этапах внедрения РЗА с

SV-потоками были случаи неправильной работы по этой причине. Восприимчивость к неисправностям синхронизации времени, т.е. к несинхронным SV-потокам, современных систем РЗА также зачастую характеризуется полной блокировкой, ограниченным временем функционирования в подобных условиях или некорректным поведением. Фактически это делает систему синхронизации времени критически важной для функционирования всей РЗА на подстанции.

Цель работы заключается в анализе возможностей по сохранению в работе системы РЗА при нарушении синхронизации времени на подстанции, реализации этих возможностей в ИЭУ РЗА и проверке в реальных условиях нарушения синхронизации времени.

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЗА

Деградация системы синхронизации времени

Источником синхронизирующего сигнала для системы синхронизации времени на подстанции являются глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС, Бэйдоу, GPS, Galileo. Сигналы от них принимаются с помощью антенны, размещенной в пределах подстанции, как правило, на крыше ОПУ для обеспечения открытости небосводу активной поверхности антенны. Первоначально системы для синхронизации ИЭУ, публикующих SV, использовали 1PPS. Современным стандартом является синхронизация устройств от сервера времени по протоколу PTP.

В нормальном режиме работы сервер времени синхронизируется с ГНСС и выступает ведущим устройством, предоставляющим глобальную синхронизацию для остальных устройств на подстанции.

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 истечению 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 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.

Развитие признаков синхронизации измерений в МЭК 61850-9-2

Релиз редакции 1.0 стандарта МЭК 61850-9-2 состоялся в 2004 году. На тот момент стандартом предусматривалось только два значения атрибута `smvSynch` 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 от разных источников делает возможным использование их измерений совместно в расчетах.

Вышедшее вскоре практическое руководство по применению МЭК 61850-9-2 от IEC International Users Group, более известное как спецификация LE, обеспечило условия для функциональной совместимости (интероперабельности) устройств разных производителей, придав сильный импульс распространению SV. Спецификация была выполнена на основе первой редакции и атрибут `smvSynch` в ней аналогичный. Однако в ревизии 3.0 практического руководства от 2005 года 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 `smvSynch` значений было достаточно для расширения возможностей функционирования РЗА. При синхронизации от локального источника `smvSynch=1` по-прежнему сохранялись условия для 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 утратили.

Дальнейшая эволюция признака синхронизации измерений SV происходит в редакции 2.0 стандарта 2011 года. К тому времени инструментальная синхронизация времени PTP Version 2 (МЭК 61588:2009) начинает вытеснять 1PPS как более удобный способ, использующий коммуникационную сеть цифровой под-

станции. Но физическое резервирование серверов времени на ПС и допустимость их подключения в режиме SAN (Single Attached Node) к обоим PRP-подсетям, приводят к увеличению количества источников времени на ПС – теперь их больше одного. А значит, признак локальной синхронизации `smvSynch=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 `smvSynch=5..254` для использования в качестве идентификатора источника времени в случае локальной синхронизации. Тем самым формально предоставляя условия сохранения в работе приложений, использующих измерения, синхронизированные от одного источника.

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 [5] в серию стандартов МЭК 61850 в виде отдельной части 9-3 в 2016 году.

Последняя на сегодня редакция 2.1 МЭК 61850-9-2 вышла в 2020 году. В очередной раз разработчиками внесены корректировки, связанные с признаками синхронизации измерений. Впервые в части 9-2 приводится рекомендация по использованию PTP [6]. Возможных значений `smvSynch` 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 неис-

правностях синхронизации времени определяется наличием подобных расчетов.

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

- требующие глобальной синхронизации SV;
- требующие глобальной синхронизации SV, либо локальной синхронизации от единого источника;
- допускающие любой тип синхронизации, в т.ч. 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. 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 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

Опыты с нарушением синхронизации времени выполнены на полигоне ВАПС ООО «Релематика». Полигон 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, соответствующий МЭК 61869-9:2016 (об-

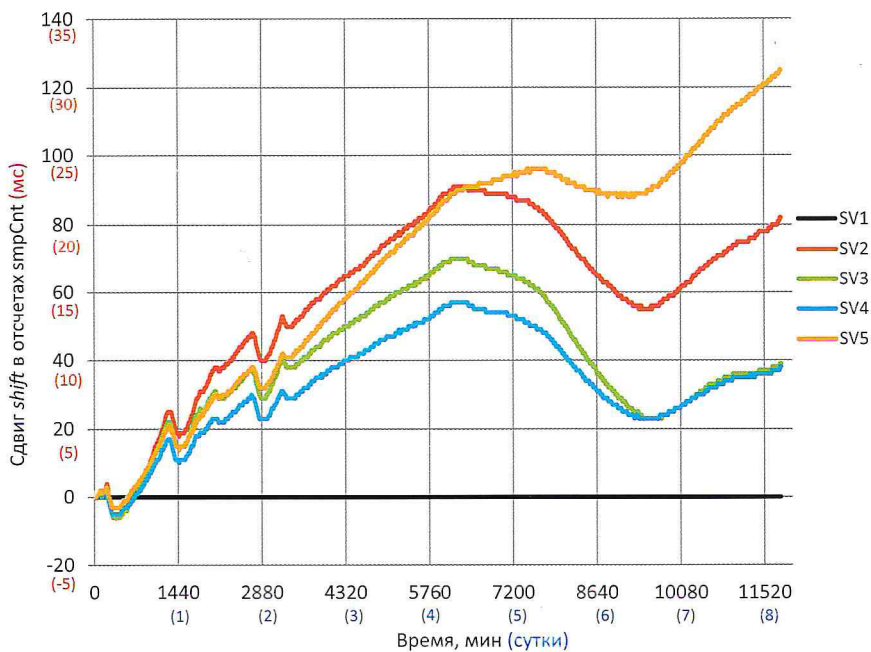


Рис. 1. Сдвиг отсчетов несинхронизированных SV-потоков относительно синхронизированного SV1

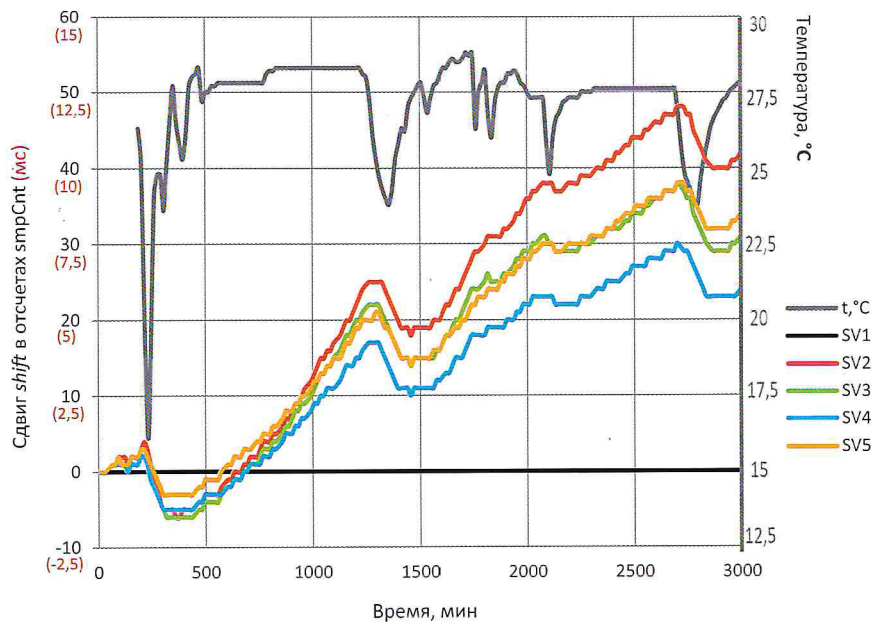


Рис. 2. Сдвиг отсчетов несинхронизированных SV-потоков относительно синхронизированного SV1 и температура окружающего воздуха

ратно совместимый с 9-2 LE), 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, одновременно отключена

PTP синхронизация на портах коммутатора, при этом SV1 оставлен как контрольный с $smpSynch=2$. После непродолжительного времени удержания отсчеты всех пяти источников начинают расходиться между собой. Эксперимент длился более 13 суток. На рис. 1 показано, как с течением времени происходил сдвиг $shift$ по индексам $smpCnt$ у последовательно приходящих пакетов SV2–SV5 относительно SV1. По рис. 2 можно заметить,

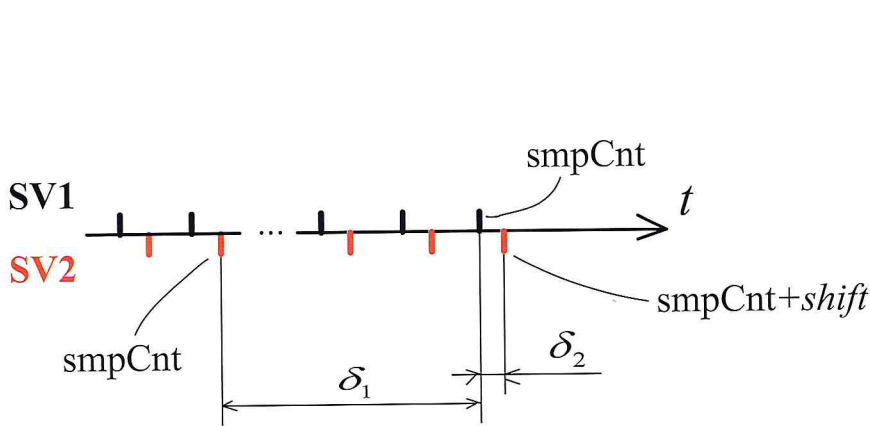


Рис. 3. Временная диаграмма пакетов SV1 и SV2 и векторная диаграмма их напряжений

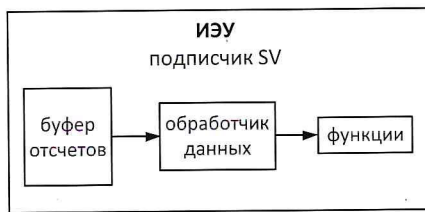


Рис. 4. Обработка SV-потоков в ИЗУ

что характеристики собственных тактовых генераторов у ИЗУ, публикующих SV, схожие и температурозависимые. Понижение температуры приводило к понижению тактовых частот генераторов у всех ИЗУ.

На рис. 3 приведены временная диаграмма поступления пакетов SV1, SV2 и векторная диаграмма напряжений из SV1 и SV2 в режиме несинхронности потоков с образовавшимся сдвигом *shift*.

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 пакетов с одинаковым индексом *smpCnt* и со сдвигом *shift* в индексах *smpCnt* приведены в таблице 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 ИЗУ РЗА

Обобщенно принцип обработки измерений SV в ИЗУ РЗА представлен на рис. 4. Буфер отсчетов обеспечивает непрерывность поступления отсчетов с измерениями в функции РЗА. МЭК 61850-5 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 ИЗУ TOP 300 адаптивный алгоритм трансляции отсчетов несинхронизированных SV.

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 $\delta_1, \epsilon_1 \rightarrow 0$.

Таблица 1. Погрешности измерений несинхронизированного SV2 относительно синхронизированного SV1

Погрешность	Измерение SV2 относительно SV1	
	пакеты с одинаковым <i>smpCnt</i>	пакеты со сдвигом <i>shift</i> по <i>smpCnt</i> , т.е. соседние
Фазная	$\delta_1 = shift \cdot 4,5^\circ - \delta_2$	δ_2
Амплитудная	$A_1 = 0$	$A_2 = 0$
Полная	$\epsilon_1 = \sqrt{2U^2(1 - \cos \delta_1)}$	$\epsilon_2 = \sqrt{2U^2(1 - \cos \delta_2)}$

В случае несинхронизированных SV-потоков, продолжение работы по данному правилу приведет к ожидаемому появлению погрешностей $\delta_1, \epsilon_1 \neq 0$. 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.

Адаптивный алгоритм трансляции отсчетов SV

Для сохранения в работе РЗА при синхронизации источников SV от разных источников и даже в условиях отсутствия источников синхронизации на ПС в ИЗУ 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 РТР самого ИЭУ РЗА не требуется. Решение совместимо с актуальным Корпоративным профилем SV ПАО «ФСК ЕЭС» и спецификацией 9-2LE. На текущий момент ИЭУ TOP 300 с поддержкой обработки несинхронизированных SV-потоков эксплуатируется на объектах электроэнергетики.

На всей продолжительности вышеописанного эксперимента ИЭУ TOP 300 выполнял прием и обработку потоков SV1–SV5 согласно адаптивному алгоритму обработки. На рис. 5 сплошной линией показаны полученные в ИЭУ РЗА фазная погрешность δ_3 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 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система высокоточной синхронизации времени – необходимый элемент ВАПС с SV-потоками, влияющий на работоспособность РЗА, к тому же подверженный угрозам информационной безопасности. Для построения надежной системы РЗА с SV-потоками 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 и которые сами не требуют в обязательном порядке высокоточной синхронизации.

Разработанное 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 информацион-

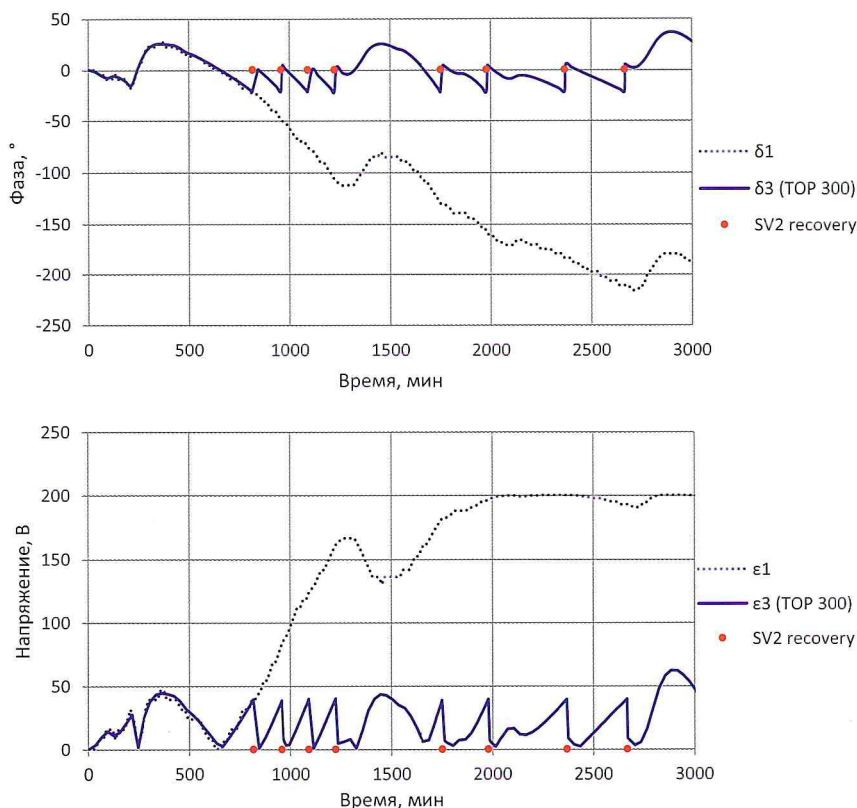


Рис. 5. Характеристики обработки несинхронизированных SV-потоков в TOP 300

ной безопасности через систему синхронизации времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. IEC 61869-9 : Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers. Edition 1.0 2016-04.
4. 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.
5. IEC 61588 / IEEE 1588TM : Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems. Edition 2.0, 2009-02.
6. 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.

7. IEC TR 61850-90-4 : Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-4: Network engineering guidelines. Edition 2.0 2020-5.

8. СТО 56947007-29.240.10.256-2018 : Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2018.

9. 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.

10. M. Geor, A. Lippit, H. Alves. Full digital substation with Process Bus – time synchronization best practice. PAC, June 2020.

11. Аношин А.О., Головин А.В. Синхронизация времени: слабое место ЦПС? [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/10/03/sinhronizatsiya-vremeni-slaboe-mesto-tsp/> (дата обращения: 15.08.2021).