

Перспективы использования ВЧ каналов в системах РЗА

Традиционно в российской электроэнергетике для построения каналов РЗА используются высокочастотные (ВЧ) тракты по линиям электропередачи (ЛЭП): для дифференциально-фазных защит (ДФЗ) и направленных защит (НЗ) с ВЧ блокировкой – каналы ВЧ защит, для комплектов ступенчатых защит (КСЗ) и систем противоаварийной автоматики (ПА) – каналы передачи аварийных сигналов и команд. Обусловлено это не только историей развития техники, но и тем, что сами ЛЭП – объекты защиты, а организованные по ним ВЧ каналы напрямую связывают защищаемые объекты энергосистем. ВЧ каналы для нужд систем РЗА и сами системы РЗА, созданные для работы по ВЧ каналам, характеризуются высокой надежностью, дешевизной, быстротой развертывания и минимальным временем устранения неисправностей ЛЭП.

Авторы:
Харламов В.А.,
Романов С.Е.

С развитием в электроэнергетике инфраструктуры волоконно-оптических кабелей (ВОК) и цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) появились аналоги работающих по ВЧ каналам систем РЗА как сами защиты, так и каналообразующее оборудование, например, дифференциальные защиты линий (ДЗЛ) и цифровые устройства передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК). Однако использование ВОК только для цифровых устройств и систем РЗА на средних и больших расстояниях оказывается экономически неэффективными. Далеко не всегда существующие системы РЗА, использующие только ЦСПИ, могут достигнуть технической и экономической эффективности систем, использующих ВЧ каналы.

В то же время вопросы использования ВЧ каналов для перспективных систем РЗА, таких как системы мониторинга переходных режимов (СМПР), Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC), цифровые подстанции (ПС) в формате МЭК 61850 и т.д., практически не рассматриваются и необходимо восполнение данного пробела.

ПАРАМЕТРЫ ВЧ ТРАКТОВ

ВЧ тракты как среда распространения сигналов (сама ЛЭП является составной частью ВЧ тракта) описываются рядом параметров, основные из которых – рабочее затухание ВЧ тракта и помехи в нем.

Рабочее затухание ВЧ тракта – разность уровня ВЧ сигнала на выходе передатчика при предположении, что его нагрузкой является активное сопротивление 75 Ом, и уровня ВЧ сигнала на противоположном окончании ВЧ тракта, также нагруженном на чисто активное сопротивление 75 Ом. Рабочее затухание ВЧ тракта зависит от ряда факторов: длины ЛЭП, типа и конструкции фазных проводов, конструкции опор, используемого оборудования обработки и присоединения, схемы подключения к проводам ЛЭП и т.д.

Величина рабочего затухания меняется во времени, например, в зависимости от климатических факторов или при изменении коммута-

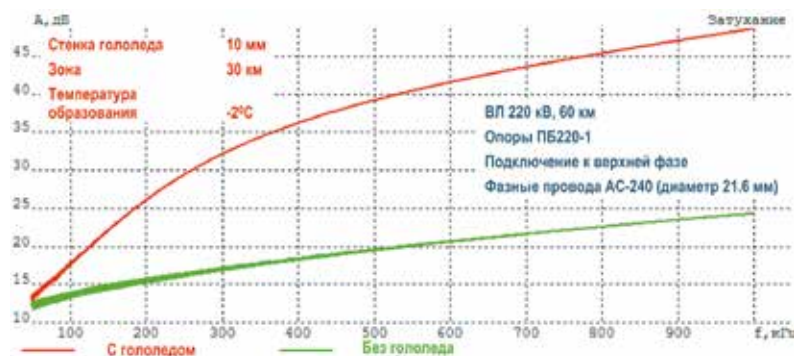


Рис. 1. Пример частотной зависимости затухания ВЧ тракта

ционного состояния ЛЭП. Наибольшее влияние на величину затухания, особенно с ростом рабочих частот, оказывают гололедно-изморозевые образования (рис. 1). Рабочее затухание и его увеличение при гололеде может быть определено по приближенным методикам, приведенным в [1] и [2], или рассчитано на базе модальной теории распространения сигналов, например, в программе WinTrakt.

При однофазных коротких замыканиях (КЗ) на воздушных линиях (ВЛ) нормируемое увеличение затухания ВЧ тракта составляет 22 дБ при схеме подключения «фаза-земля» [2].

В ВЧ трактах присутствуют различные помехи, описание которых приведено в таблице 1.

Уровень непрерывных помех имеет вероятностный характер и существенно зависит от погодных условий, но может быть приближенно определен по методикам, приведенным в [1] и [2], или рассчитан по точным методикам, учитывающим распространение ВЧ сигналов.

Вероятностные параметры импульсных помех практически не предсказуемы, но их наличие следует учитывать при проектировании систем, использующих ВЧ каналы.

СИГНАЛЫ В ВЧ КАНАЛАХ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ РЗА

Сигналы, используемые в аппаратуре каналов ВЧ защит и УПАСК, и их обработка выбираются с учетом особенностей параметров ВЧ трактов.

В ДФЗ наиболее распространено использование амплитудной манипуляции ВЧ сигнала током промышленной частоты защищаемой ЛЭП (рис. 2). Приемник ВЧ аппаратуры ДФЗ одновременно принимает сигналы собственного передатчика и передатчика с противоположного конца защищаемой ЛЭП. При КЗ вне защищаемой ЛЭП на одном ее конце ток направлен в линию и из линии на другом, и при пуске передатчиков ВЧ сигнал на входе приемников присутствует непрерывно. При наличии КЗ на защищаемой ЛЭП импульсы ВЧ сигналов накладываются друг на друга и на входе приемников, и, соответственно, на их выходах сигнал исчезает, что приводит ДФЗ в действие. Очевидно, что при отказе канала



Рис. 2. Амплитудная манипуляция в ВЧ аппаратуре ДФЗ

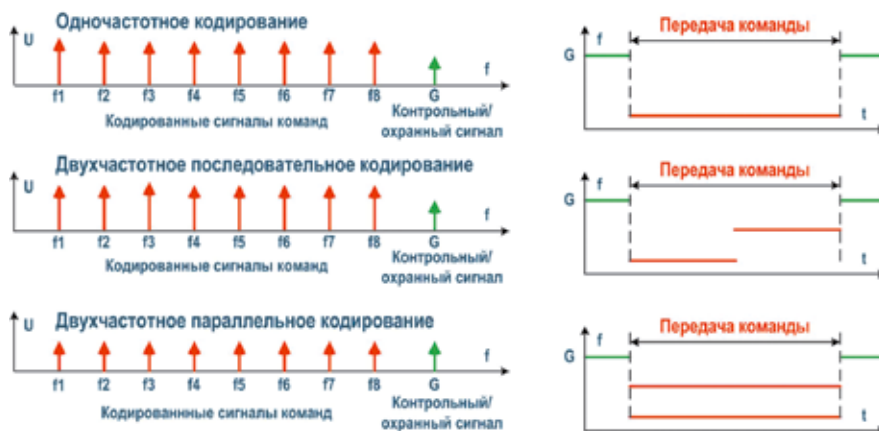


Рис. 3. Кодированные ВЧ сигналы в УПАСК

из-за увеличения затухания ВЧ тракта при КЗ на ЛЭП защита не откажет в действии. Для корректной работы ДФЗ важна точность манипуляции ВЧ сигнала при переходе тока через ноль.

В УПАСК для обеспечения требуемого времени передачи команд, надежности (вероятности пропуска команд) и безопасности (вероятности ложной команды) используются кодированные ВЧ сигналы (рис. 3). Передача команд осуществляется прерыванием постоянно

передаваемого при их отсутствии контрольного/охранного сигнала и передачей вместо него кодированных сигналов команд.

Обработка охранного сигнала и сигналов команд в приемниках УПАСК осуществляется в узкой полосе, что позволяет обеспечить передачу команд при отношении сигнал/шум 6 дБ в канале 4 кГц и снизить влияние трудно предсказуемых импульсных помех, которые имеют широкополосный спектр.

Таблица 1. Помехи в ВЧ трактах

Тип помехи	Уровень относительно принимаемого ВЧ сигнала	Длительность
Непрерывные		
Могут быть рассчитаны		
Шум от частичных разрядов исправных изоляторов	Низкий, меняется во времени	Постоянно
Шум от коронирования фазных проводов на ВЛ 110 кВ и выше	Низкий, меняется во времени	Постоянно
Сторонние ВЧ и радио каналы	Зависит от мощности стороннего передатчика и механизма влияния	Зависит от мешающего канала
Импульсные		
Трудно предсказуемые		
Разряд молнии	Высокий	10 ... 1000 мс
Короткое замыкание	начало	2 ... 20 мс
	горение дуги	100 мс
Коммутация выключателя	Высокий	5 ... 20 мс
Коммутация разъединителя	Высокий	500 ... 10000 мс

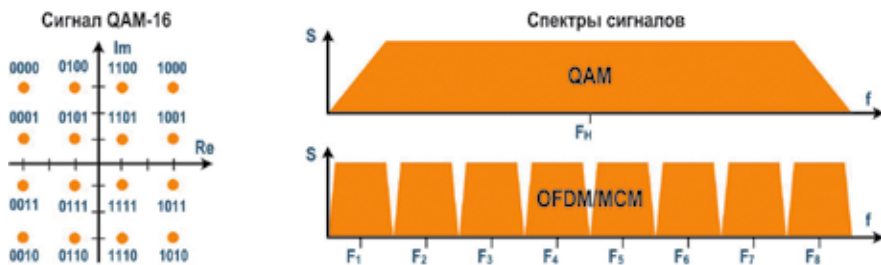


Рис. 4. QAM и OFDM



Рис. 5. Скорость передачи данных в ЦВЧ канале с полосой 4 кГц при вероятности ошибки 10^{-6}

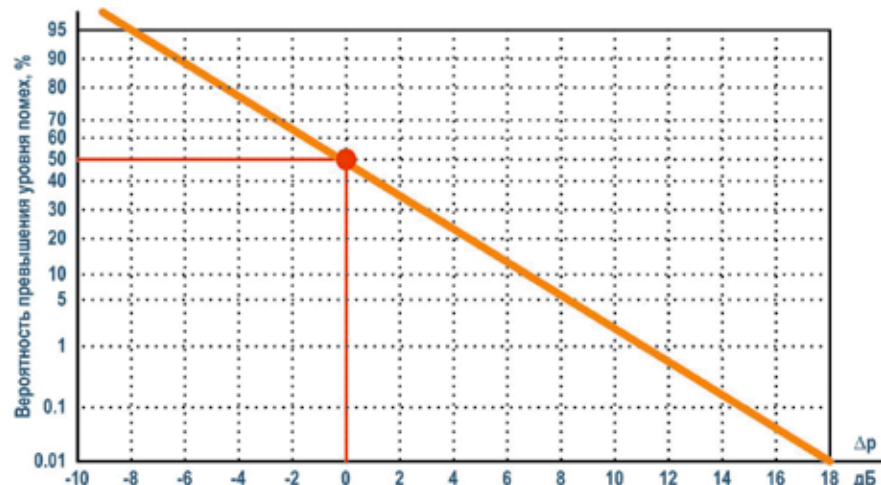


Рис. 6. Вероятность превышения номинального уровня шумов ЛЭП

ЦИФРОВЫЕ ВЧ КАНАЛЫ

Традиционно используемые в ВЧ каналах модемы с частотной манипуляцией (ЧМ) обеспечивают высокую помехозащищенность, обеспечивая вероятность ошибки 10^{-6} при отношении сигнал/белый шум (ОСШ) около 15 дБ в полосе сигнала, и небольшую задержку 10–20 мс при скорости передачи данных 100–2400 бит/с. В последнее время в ВЧ каналах [3] используются более сложные модуляции Quadrature Amplitude Modulation (QAM) с одной несущей частотой и Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) с большим числом несущих частот (рис. 4). QAM и OFDM обеспечивают более высокую спектраль-

ную эффективность по сравнению с ЧМ, что позволяет реализовывать цифровые ВЧ (ЦВЧ) каналы с относительно высокой скоростью передачи данных.

Для QAM, обладающей относительной простотой реализации, характерны:

- низкое отношение пиковой мощности сигнала к действующей (достижимо 3–4 дБ);
- небольшая задержка (десятьки мс), но больше, чем в ЧМ модемах;
- меньшая помехозащищенность по сравнению с ЧМ;
- большое время восстановления канала после его прерывания, например, после воздействия импульсных помех большой амплитуды при коммутации разъединителей;

- чувствительность к отраженным ВЧ сигналам, возникающим на ЛЭП (отражения от концов ВЧ тракта, ответвлений и т.д.), что приводит к искажениям амплитудной и фазовой характеристик ВЧ тракта и необходимости использования сложных эквалайзеров, увеличивающих задержку;
- чувствительность к сосредоточенным по спектру и импульсным помехам, помехам от коронирования проводов ЛЭП, что требует специальной сложной обработки для уменьшения их влияния и соответственно увеличивает задержку.

Более сложной в реализации OFDM присущи:

- высокое отношение пиковой мощности сигнала к действующей (порядка 10 дБ);
- большая задержка (при полосе канала 4 и 8 кГц может достигать сотен мс, растет при увеличении числа несущих частот);
- меньшая помехозащищенность по сравнению с ЧМ;
- большое время восстановления канала после его прерывания;
- устойчивость к возникающим на ЛЭП отраженным сигналам (не требуется сложный эквалайзер);
- устойчивость к сосредоточенным по спектру помехам за счет возможности отключения пораженных помехой подканалов;
- большая устойчивость по сравнению с QAM к импульсным помехам и «короне»;
- чувствительность к сдвигу частоты и фазовому шуму.

На рис. 5 приведен пример зависимости скорости в ЦВЧ канале с полосой 4 кГц от ОСШ. Достигнуть скорости более 24 кбит/с в ЦВЧ канале с полосой 4 кГц довольно сложно, т.к. для этого необходимо обеспечить отношение ОСШ 32 дБ (для сравнения, в аналоговом телефонном канале нормируемое ОСШ составляет 26 дБ). А с учетом нестационарной природы помех от «короны» данное значение увеличится на 5–7 дБ в зависимости от реализации ЦВЧ аппаратуры и напряжения ЛЭП. Расширение полосы ЦВЧ канала, что не всегда осуществимо на практике, позволяет увеличить скорость передачи данных при том же ОСШ и уменьшить его задержку.

В методике проектирования [2] в качестве номинального уровня помех выбран уровень с 50 % вероятностью его превышения (слабый дождь). Нормируемый запас по затуханию для ЦВЧ канала установлен равным 9 дБ без учета гололеда (сильный дождь). Согласно графику из [1] (рис. 6), при этом обеспечивается коэффициент готовности ЦВЧ канала около 0,97.

Для аналогового телефонного канала такой выбор коэффициента готовности приводит к тому, что он становится несколько «шумным» в некоторые периоды времени, но поддерживать разговор по нему по-прежнему можно. Для цифрового канала РЗА такое допущение не приемлемо, т.к. уменьшение ОСШ на 3–5 дБ относительно нормируемого значения придет к его полному отказу (рис. 7) – вероятность ошибок превысит 10^{-3} .

Для обеспечения высокой надежности ЦВЧ канала с коэффициентом готовности не менее 0,99–0,995, требуемого в РЗА, необходим запас по затуханию порядка 11–12 дБ, что требует изменения существующей методики проектирования ЦВЧ каналов в [2].

Таким образом, при построении систем РЗА с использованием ЦВЧ каналов необходимо учитывать:

- ограничения по скорости передачи данных и задержку;
- отказ каналов из-за увеличения затухания ВЧ трактов при КЗ на ЛЭП и прерывание передачи данных в следствие воздействия больших импульсных помех.

ЦИФРОВЫЕ ВЧ КАНАЛЫ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ РЗА

Перспективные системы РЗА требуют наличия высокоскоростных каналов для передачи IP/Ethernet трафика, например, СМНР – данных с устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) в диспетчерские центры, WAMPAC – данных УСВИ и управляющих воздействий, цифровые ПС – GOOSE сообщений между ними.

Очевидно, что передача GOOSE сообщений по ЦВЧ каналам нереализуема из-за их отказов при КЗ на ЛЭП, т.е. тогда, когда требуется передача управляющих воздействий.

Требования к быстродействию использующих УСВИ систем без привязки к типу канала связи приведены в таблице 2.

Данные с одного УСВИ согласно СЗ7.118.2-2011 передаются пакетами размером 38 байт при использовании формата данных с плавающей запятой или 28 байт при формате данных с фиксированной точкой. Если не используются технологии сжатия заголовков UDP/IP, то по ЦВЧ каналу дополнительно передаются IP заголовок в 20 байт и UDP заголовок в 8 байт. Для передачи данных одного УСВИ с частотой 50 Гц требуется скорость ЦВЧ канала не менее 26,4 кбит/с в формате с плавающей запятой (информационная скорость без UDP/



Рис. 7. Пример зависимости вероятности ошибок в ЦВЧ канале от ОСШ

IP – 15,2 кбит/с) и 22,4 кбит/с в формате с фиксированной точкой (информационная скорость – 11,2 кбит/с).

ЦВЧ каналы с полосой более 16–20 кГц могут обеспечить требуемые скорости и задержки (при отсутствии перебоев по цифровым интерфейсам). Но прерывания ЦВЧ каналов (например, работа разъединителей может прервать канал на время более 10 секунд), ошибки при разрядах молнии и работе выключателей, отказ при КЗ на ЛЭП делают крайне затруднительным их использование в быстросрабатывающих on-line системах РЗА.

В то же время не существует неустраняемых ограничений для использования ЦВЧ каналов в off-line системах РЗА, например, в СМНР для скачивания архивов данных УСВИ с серверов по ftp для аналитических и расчетных приложений.

ВЧ КАНАЛЫ И ЦСПИ

Широкое распространение в технологических и корпоративных системах электроэнергетики получили системы с использованием цифровых каналов как по выделенным оптическим волокнам (ОВ) в ВОК, так и по ЦСПИ. При этом в ЦСПИ

Таблица 2. Требования к быстродействию функционирования систем по данным ОАО «СО ЕЭС»

Режим работы УСВИ	Система	Приложение	Быстродействие
On-line	Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ)	Расчетные задачи	Не регламентируется
Off-line		Советчик технолога	< 5 с
	Система автоматического управления (САУ)	Режимная автоматика	< 1 с
		Противоаварийная автоматика	<< 1 с (20–100 мс)

Таблица 3. Сравнение ВЧ каналов и ЦСПИ по ВОК

ВЧ каналы по ЛЭП		ЦСПИ по ВОК	
+	Область использования в РЗА: ДФЗ, НЗ с ВЧБ, УПАСК для КСЗ с ТУ и ТО и систем ПА	+	Область использования в РЗА: ДЗЛ, НЗ с передачей блокирующих сигналов, УПАСК для КСЗ с ТУ и ТО и систем ПА
+	Большая протяженность без ретрансляторов	-	Ограниченная протяженность без ретрансляции (за разумную стоимость)
+	Быстрое устранение неисправностей ЛЭП	-	Иногда неопределенно большое время устранения неисправностей ВОК
-	Влияние электромагнитных помех на прием сигналов (удары молнии и т.д.)	+	Устойчивость к электромагнитным помехам
+	Использование существующей надежной среды распространения сигналов	-	Потребность в дополнительных инвестициях для прокладки ВОК
-	Небольшое число каналов и ограниченная пропускная способность	+	Большое число каналов и высокая скорость передачи данных
-	Большая задержка в каналах	+	Небольшая задержка в каналах
+	Высокая информационная безопасность на уровне каналов и при отсутствии реализации удаленного доступа на уровне оборудования и системы	-	Низкая информационная безопасность, как на уровне каналов, так и оборудования, системы и систем управления

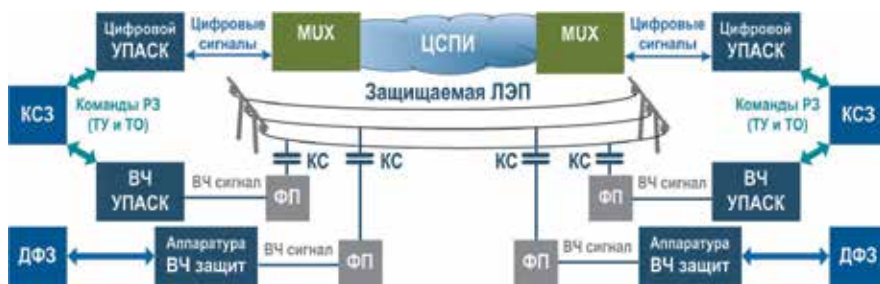


Рис. 8. Резервирование защит ЛЭП

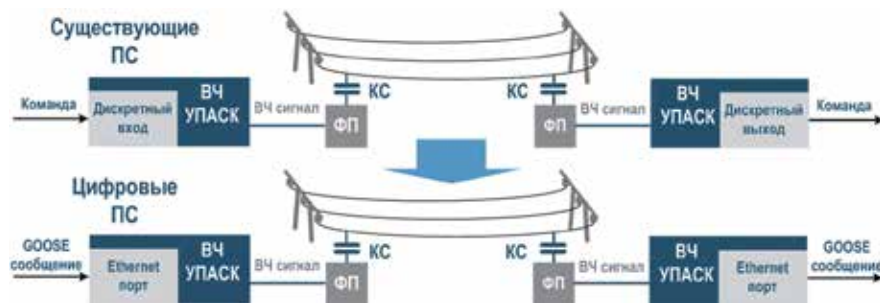


Рис. 9. Передача GOOSE сообщений по ВЧ каналу

могут использоваться различные технологии: Synchronous Digital Hierarchy (SDH), Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH), Multi-protocol Label Switching (MPLS) и т.д. ЦСПИ по ВОК, также как и ВЧ каналы, имеют свои особенности. В таблице 3 приведено их сравнение.

Следует отметить, что у существующих систем РЗА, использующих ВЧ каналы, есть некоторые преимущества. Например, при падении опоры ЛЭП и нарушении цифрового канала из-за обрыва ВОК в грозотросе ДЗЛ полностью блокируется, в то время как ДФЗ при повреждении ВЧ канала не отказывает в действии.

Очевидно, что совместное использование ВЧ каналов и каналов по ЦСПИ в РЗА позволяет нивелировать их минусы, например, как это показано на рис. 8 для защиты ЛЭП.

При этом достигается крайне высокая надежность за счет:

- резервирования защит ЛЭП;
- резервирования каналаобразующего оборудования РЗА;
- резервирования среды распространения сигналов.

Если в приведенной схеме вместо ДФЗ использовать ДЗЛ по ЦСПИ, то для того, чтобы приблизиться к той же надежности, необходимо использовать два мультиплексора и ВОК, что значительно увеличит стоимость. Кроме того, защита ЛЭП будет более зависима от ЦСПИ, в которой

актуальными являются вопросы обеспечения информационной безопасности, и работа которой подвержена влиянию случайного человеческого фактора. Поэтому актуальной является реализация схемы, приведенной на рис. 8, в рамках концепции цифровой ПС.

ВЧ КАНАЛЫ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ РЗА

Использование ЦВЧ каналов для быстродействующих перспективных систем РЗА невозможно или крайне затруднительно. Поэтому необходим другой подход, состоящий в использовании традиционных принципов передачи ВЧ сигналов систем РЗА.

Для передачи GOOSE сообщений между объектами нет необходимости передавать само GOOSE сообщение в цифровом виде. Для этого достаточно в УПАСК преобразовать его информационную часть в кодируемые ВЧ сигналы в передатчике и обратно в GOOSE сообщение в приемнике (рис. 9). Данный подход позволяет организовать передачу управляющих воздействий между существующими и цифровыми ПС, когда на одной стороне в УПАСК используются дискретные входы/выходы, а на другой – Ethernet порт. При этом может быть использована традиционная методика проектирования ВЧ каналов.

Как ранее упоминалось, для корректной работы ДФЗ необходима точная манипуляция ВЧ сигнала при переходе тока промышленной частоты через ноль (рис. 2). На существующих ПС манипуляция производится сигналами с выходов аналоговых токовых трансформаторов, которые практически мгновенно поступают на вход манипуляции ВЧ аппаратуры. В цифровых ПС выходами токовых трансформаторов являются SV (отсчеты токов) с частотой дискретизации 4 кГц, что позволяет без использования интерполяции обеспечить точность манипуляции 250 мкс. Но при передаче SV по станционной Ethernet сети возникает джиттер, величина которого зависит от топологии сети, используемого оборудования и загрузки сети. Для корректной манипуляции ВЧ сигнала, и соответственно корректного последующего сравнения фаз, необходима установка буфера для компенсации джиттера станционной сети. Задержки, вносимые станционной шиной и буферами компенсации джиттера должны быть одинаковы на обеих ПС, т.е. оба буфера должны быть синхронизированы, что невозможно обеспечить без меток времени от единого источника синхронизации. В любом случае, быстродействие ДФЗ на цифровых ПС будет хуже, чем на существующих, из-за задержки манипуляции ВЧ сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЦВЧ каналы имеют крайне ограниченную область применения в перспективных on-line системах РЗА из-за невозможности обеспечения в них требуемой надежности. В off-line системах РЗА неустраиваемых ограничений для использования ЦВЧ каналов нет. Использование традиционных ВЧ каналов и аналоговых ВЧ сигналов актуально как в существующих, так и в перспективных системах РЗА.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-33.060.40.052-2010. Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35-750 кВ переменного тока.
2. СТО 56947007-33.060.40.045-2010. Руководящие указания по выбору частот высокочастотных каналов по линиям электропередачи 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ.
3. IEC 62488-1. Power line communication systems for power utility applications – Part 1: Planning of analogue and digital power line carrier systems operating over EHV/HV/MV electricity grids.