



PS5 – S6-02



Применение всех доступных результатов синхронизированных векторных измерений

Р. МОКСЛИ, Г. РЖЕПКА, Э. ЭРСОНМЕЦ, Б. ФЛЕРХИНГЕР
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
USA
roy_moxley@selinc.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Синхронизированные векторные значения, противоаварийная автоматика, надежность, архивирование, IEC 61850.

1 ВВЕДЕНИЕ

Существующие технологии синхронизации векторов позволяют получать сигнал точного времени в любом месте энергосистемы. Первый стандарт IEEE предусматривал использование сигнала точного времени для сравнения электрических величин в различных точках электрической сети [1]. Последующий стандарт IEEE C37.118 обеспечил работу с сигналами, частота которых отлична от номинальной, и включал дополнительные данные в пакет синхронизации [2]. Стандарт для измерения векторных значений изображен как опорный сигнал на рисунке 1 [3]. Этот опорный сигнал определен как косинусоида с максимумом в каждой секунде и распространяющаяся со строго номинальной частотой. Локальные измерения затем сравниваются с опорным сигналом, как показано на рисунке 1 б

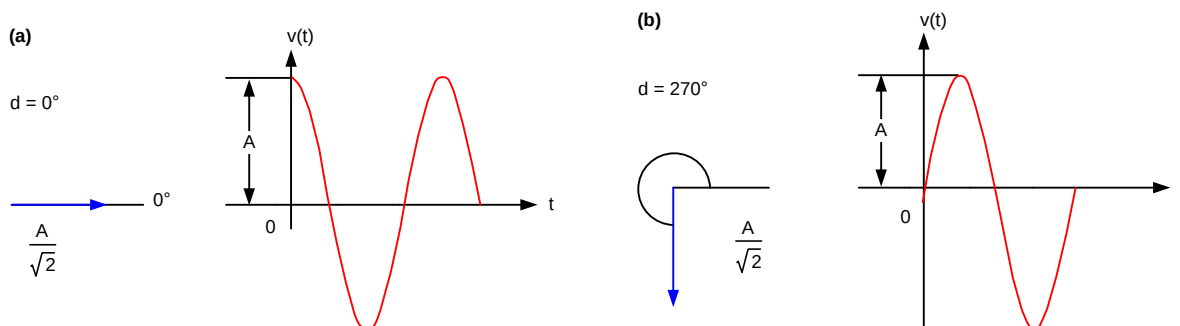


Рис. 1: Опорный сигнал (а) и сигнал в месте измерения (b) со сравнением углов.

Традиционные протоколы передачи данных (такие как DNP3, Modbus[®], or OPC) передают только амплитуду и состояние измерения. Эти системы обновляют информацию каждые несколько секунд или минут. Данные не синхронизированы, что делает сложным определение состояния системы. Использование синхронизированных измерений электрических величин и значений состояния обеспечивают много дополнительных преимуществ.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Опыт использования IEEE 1344 показал недостатки в динамических характеристиках и технических требованиях и поэтому стандарт был обновлен до IEEE C37.118. Сегодня это основной протокол для обмена синхронизированными векторными значениями. Этот стандарт включает требования к измерениям, а так же протокол передачи данных. Протокол IEEE C37.118 это протокол поточной передачи, при помощи которого сообщения посылаются с переменной скоростью от 1 до 60 сообщений в секунду или быстрее, если это предусмотрено.

В этой статье внимание сфокусировано на информацию, доступной помимо векторов. Традиционные протоколы, используемые в электроэнергетике, включают двоичную информацию, такую как положение выключателей и разъединителей, наряду с аналоговыми данными, такими как величина тока. Добавление данных о синхронизации повышает полезность этих данных.

IEEE C37.118 определяет формат передачи двоичных данных [2], но не требует какой либо определенной среды или механизма их передачи. Сегодня большинство внедрений используют протоколы передачи данных (TCP/IP) или протокол последовательного обмена EIA-232. EIA-232 в основном используется на подстанциях или для передачи небольшого количества данных от единичных устройств первичного измерения векторов (single phasor measurement unit (PMU)). В системах противоаварийной автоматики, включающих большое количество таких первичных устройств измерения в основном используется сеть с IP – адресацией. Подстанции могут быть соединены друг с другом и с диспетчерским центром при помощи различных цифровых сетей

Общее время задержки сигнала может становиться решающим фактором если синхронизированные измерения используются в системах управления реального времени, таких как управление генератором [4], или управление другими активными устройствами [5] в энергетической системе. В случае использования синхронизированных данных для управления выключателем [6], в основном именно задержка сигнала определяет ту максимальную частоту скольжения, которая может быть допустима при включении. Типичное время задержки лежит в диапазоне от нескольких миллисекунд до 1 секунды. Поскольку сигналы собираются концентратором данных (PDC), то необходимо учитывать также и его задержку. Аппаратные концентраторы, применяемые на подстанциях, работают с задержками менее чем 10 миллисекунд, в то время как некоторые программные концентраторы, запускаемые на операционных системах, имеют задержки достигающие пол секунды и более.

В IEEE C37.118 существуют четыре типа кадров сообщений: данные, конфигурация, команда и заголовок. У каждого из этих типов есть свои особенности, которые позволяют использовать их в различных синхронизированных системах. Клиенты посылают командный кадр в устройства первичного измерения с запросом их конфигурации и кадр заголовка для начала или остановки передачи данных. Кадр данных включает в себя актуальные данные, посылаемые в произвольной двоичной форме в формате целых чисел, чисел с плавающей точкой или формате логического числа.

Кадр конфигурации определяет структуру данных для того, чтобы клиент знал, как интерпретировать произвольные байты. Кадр заголовка сегодня в основном не используется, но он предназначен для передачи какой либо важной информации об устройстве измерения или концентраторе в виде текста

Структура IEEE C37.118 включает общее поле заголовка (не путать с кадром заголовка) в начале и контрольную сумму циклического избыточного контроля в конце.

3 СТРУКТУРА СООБЩЕНИЯ IEEE C37.118

Независимо от типа IEEE C37.118 использует следующую структуру сообщения (таблица 1). Каждое сообщение включает в себя поле заголовка.

Поле заголовка	Описание	Байты
SYNC	Обеспечивает синхронизацию и индикацию типа кадра; Биты 4–6 определяют тип кадра (данные, конфигурация, заголовок или команда)	2

FRAMESIZE	Сообщает общее количество байтов в структуре, включая биты контрольной суммы	2
IDCODE	Идентифицирует отдельную единицу PMU, которая посылает (или получает), сообщение	2
SOC	SOC (секунда столетия) и FRACSEC вместе обеспечивают метку времени, основанную на начале отсчета, начинающемся в полночь 1 января 1970	4
FRACSEC	Включает 24-битовую действительную часть целого числа, кодирующего секунды и 8-битовый флаг качества времени	4

Табл. 1: Краткое описание полей заголовка сообщения IEEE C37.118

Отметим, что каждое сообщение имеет идентификационный код (ID CODE) посылаемый PMU. Положим, что данные часто посылаются по коммутируемым сетям (последовательным или Ethernet), это важно для рассмотрения в системах управления. Кадры данных включают поле состояния и измеренные величины, такие как векторы, аналоговые и цифровые данные, частота и производная частоты (df/dt).

Информация в сообщении IEEE C37.118, которая нас интересует в рамках данной статьи, прежде всего, находится в полях SOC, FRACSEC, ID CODE и специальных полях кадров данных.

4 ПОЛЕЗНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ПОСЫЛАЕМАЯ В КАЖДОМ КАДРЕ ДАННЫХ C37.118

Теперь, когда мы знаем тип и структуру IEEE сообщения C37.118, рассмотрим полезную информацию, которая посылается как часть данных сообщения.

Включенное в FRACSEC слово имеет размер 4 бита, которые показывают состояние часов в системе GPS. Эти биты сообщают: что часы GPS синхронизированы и работают, как ожидалось или, что часы не синхронизированы и работают с точностью, представленной в отчете, или есть ошибка и время часов недостоверно.

Это обеспечивает пользователю уверенность в том, что каждое сообщение снабжено точной меткой времени и снабжает битами данных, которые используются в формулах для выбраковки поврежденных данных

4.1 Информация о состоянии PMU

Много полезной информации посылается как часть 2-байтового или 16-битового слова состояния в поле данных. Биты, которые могут быть самыми полезными, перечислены в Таблице 2.

Биты	Описание	Состояние
0–3	Определяют конкретный триггер PMU	При помощи триггера выбирается величина доступная для PMU, включая электрические величины (v , i , f , df/dt , или иные) или данные состояния, такие как положения разъединителей.
4, 5	Передаются, если PMU синхронизирован и привязан к часам или если нет, то как долго не осуществлялась привязка.	Возможные состояния: привязан, не привязан в течение 10, 100 и 1000 с
10	Сообщает, что конфигурация PMU была изменена	На 1 минуту устанавливает флаг, если конфигурация была изменена
11	Обнаружение переключения триггера PMU	Единственный бит, показывающий, что произошла смена положения триггера PMU
13	Синхронизация PMU	Показывает, что PMU синхронизирован с часами
14	Ошибка PMU	Указывает, что есть ошибка PMU
15	Бит достоверности данных	Показывает, работает PMU в тестовом режиме или нет

Табл. 2: Краткий обзор полей данных и битов STAT.

4.2 Использование битов состояния

Из различных битов состояния, мы можем использовать биты 13, 14 и 15, для того, чтобы быть уверенными, что данные, посылаемые PMU актуальны, достоверны, и синхронизированы по времени. Бит 10 может быть использован для предупреждения пользователя, если конфигурация PMU изменилась, что могло вызвать ошибки в логике управления, использующей данные PMU. Контролируя и записывая биты 4 и 5, легко выявить неустойчивые отклонения часов и соотнести их с другими событиями. Кроме того, эти биты могут быть использованы для определения длительности перебоев, также как для выявления неисправных часов или частичной блокировки антенны часов, или ограничении приема сигнала GPS.

Биты переключателя с 0 до 3-его используются для сбора данных о различных положениях переключателей в PMU, они могут использоваться для управления информацией или инициировать запись данных в течение определенного периода.

4.3 Информация в полях данных

Информация в полях данных включает:

- Векторы (напряжение и ток, с модулем и углом)
- Частота и ее производная
- Аналоговые данные (любые измеренные аналоговые данные или расчетные данные, использующие аналоговые замеры)
- Дискретные данные (любые цифровые данные имеющие состояния «0» или «1»)

Каждое сообщение, имеющее метку времени, посылаемое PMU, включает все вышеупомянутые поля данных сообщения. Очевидно, что стандарт IEEE C37.118 был разработан специально для определения и передачи синхронизированных векторных измерений. Измерения реального времени и согласованные во времени измерения напряжения (модуль и угол), тока (модуль и угол), частоты и ее производной во всей энергосистеме имеют множество применений.

Биты состояния становятся ключевой составляющей систем управления реального времени использующих синхронизированные векторные значения, и важность этого утверждения может быть обосновано в отдельных схемах управления, рассмотренных в следующих примерах:

4.3.1 Пример 1

Разность фаз напряжений в энергосистеме используется для прямого отключения генератора при избыточной передаваемой мощности. В этом случае для уверенности точной синхронизации, данные должны быть дополнены битом состояния. Если синхронизация потеряна на любом конце системы, тогда разность фаз будет не точной, что приведет к снижению надежности системы автоматики. Информация о снижении частоты, представленная в виде дискретного сигнала или аналоговой величины, также может быть использована для предотвращения отключения генераторов, если генераторы должны остаться в работе.

4.3.2 Пример 2

Поскольку синхронизированные данные потоковые, они могут быть полезным источником различных величин для управления, даже если точная синхронизация не требуется. В системах управления статическими компенсаторами, величина напряжения из удаленного места направляется в схему управления для предотвращения перенапряжения.

Если сигнал времени потерян, величина напряжения может оставаться точной и пригодной для целей управления.

Суть этих примеров в том, что нет общего правила в использовании битов состояния. Данные об угле вектора требуют привязки ко времени в любом месте. Величина или аналоговые данные могут не требовать точной метки времени.

5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ IEEE C37.118 В ПРИМЕНЯЕМЫХ СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Применения, которые используют синхронизированные векторные значения и измерения частоты, позволяют синхронизировать части сети или генерацию и сеть [6], обнаруживая условия выделения распределенной генерации в режим изолированной работы [7]. В каждом из этих примеров, помимо векторов используются некоторые данные, которые улучшают функциональность схемы.

5.1 Синхронизация генерации с сетью

Использованы PMU, расположенные по обе стороны от выключателя, выполняющего синхронизацию систем, которые постоянно передают модуль напряжения, его угол, частоту и производную частоты в PDC и систему визуализации данных, что дает возможность вручную включить выключатель или управлять действиями оперативного персонала в изолированной части генерации (рисунок 2).

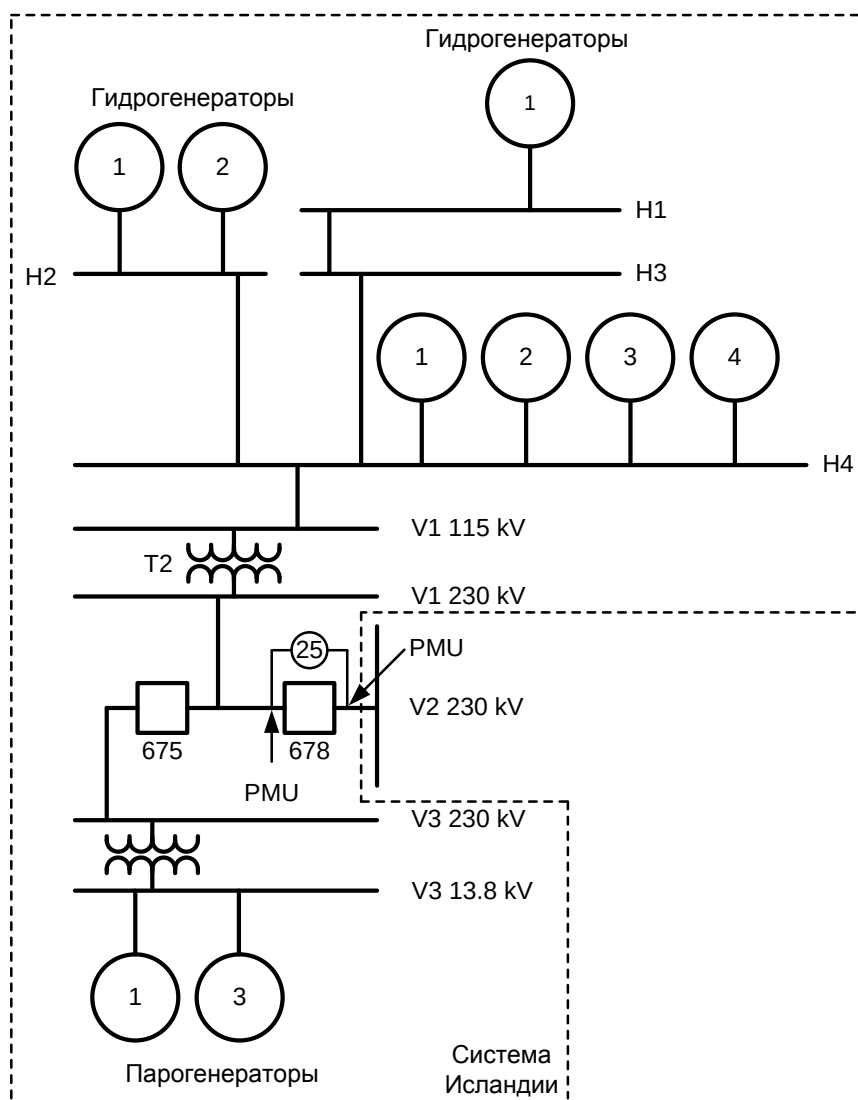


Рис. 2: Синхронизация в системе Исландии

В этом случае, для выполнения синхронизации необходимо сравнивать только векторы и частоту скольжения, в свою очередь добавление цифровой информации увеличит безопасность данной схемы. Рассматриваемый ручной синхроскоп показан на рисунке 3.



Рис. 3: Ручной синхроскоп с индикаторами частоты и напряжения и двумя контрольными лампами

Оператор, использующий традиционные методы синхронизации систем, будет наблюдать за разностью фаз, напряжений, частот по контрольным лампам и визуальному индикатору разницы напряжений и частоты скольжения. Данные IEEE C37.118. могут быть использованы и для объединения этих функций. Дополнительно, биты данных о состоянии PMU и синхронизации времени удостоверяют качество данных для автоматизированных схем.

5.2 Использование не векторных аналоговых данных

Аналоговые данные могут быть использованы для передачи измеренных и расчетных величин, а именно векторные измерения (также как другие локальные входы), которые вычисляются в PMU, и затем передаются как аналоговые данные в виде 16-битового целого числа или 32-х битового числа с плавающей точкой. Вычисления также могут выполняться с использованием любых измеренных аналоговых данных. Примерами рассчитанных величин, которые могут представлять интерес, могут быть текущее сопротивление линии или нагрузка, расчет которой использует величину напряжения, тока и угол между ними, а также величина и направление перетока мощности по линии. Это делает возможным рассчитать температуру проводов, базируясь на замерах напряжения и тока, используя вход для окружающей температуры для уточнения данных.

Внешние измерения могут быть внесены в PMU как аналоговые величины с использованием датчиков и аналоговых общих объектно-ориентированных событий подстанции (GOOSE) сообщений по протоколу IEC 61850. Использование аналоговых входов позволяет измерять величины, такие как опорное (атмосферное) давление, уровень масла, температура, скорость вращения и положение РПН. К примеру, сопротивление резистивного датчика температуры (RTD) который измеряет температуру в диапазоне от -50 до +250 град подключается к устройству, которое соединено с последовательным входом PMU. Резистивный датчик может быть использован для точного измерения температуры трансформаторов, выключателей моторов или генераторов в различных точках, обеспечивая дополнительные сведения для управления оборудованием. Аналоговые величины могут быть внесены в PMU с использованием программируемых автоматических контроллеров (PAC). Типичный PAC контроллер будет соединен с аналоговым входом, и будет отправлять входные данные посредством IEC 61850 GOOSE – сообщений в PMU для включения их в передаваемые аналоговые данные. Устройства PMU могут отправлять различные аналоговые данные в единичном синхронизированном сообщении. Метка времени сообщения относится ко всем замерам.

5.3 Измерения температуры для определения пределов изменения нагрузки

Использование синхронизированных векторных значений для динамических измерений системных параметров, таких как сопротивление линии, было испытано для целей повышения точности. Точная оценка динамически изменяющейся линии обеспечивает улучшение использования линии особенно в аварийных ситуациях.

Фактор, усложняющий применение синхронизированных векторов для измерения температуры линии проистекает из точности, требуемой при измерении углов. Рассмотрим выражения, полученные для П-образной модели, показанной на рисунке 4.

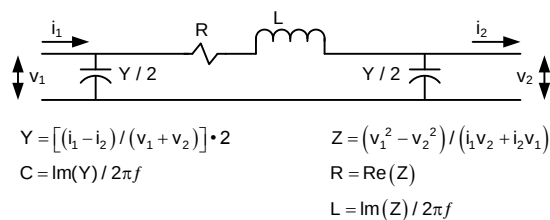


Рис. 4: П-образной модель с расписанными параметрами линии.

Т.к. все величины напряжений и токов в уравнениях, показанных на рис.4, векторные, то небольшая ошибка в значениях фаз дает большую ошибку в сопротивлении. Протяженность линии (особенно более 100 км) и большая нагрузка минимизируют эту ошибку. Также ошибка может быть уменьшена введением данных о температуре в РМУ и выполнением аналогового расчета температуры. Передача этих расчетных данных как аналоговых величин, вместе с данными векторов, которые используются для расчета температуры, обеспечивает дополнительную проверку и исходные данные для калибровки.

5.4 Использование двоичных данных для обмена синхронизированной информацией о состоянии

Сообщение IEEE C37.118 содержит 2 байта, или 16 битов, двоичных слов состояний. Эти двоичные данные хороши для эффективного обмена информацией о состоянии оборудования в базисе реального времени. В связи с тем, что синхронизированные данные постоянно обновляются, они обеспечивают информацию о состоянии как события, происходящие совместно с другой информацией, такой как векторы токов, напряжений и аналоговыми данными.

На станциях с ограниченной величиной пропускной способности, биты дискретных данных являются эффективным способом обмена информацией. Всего с использованием 16 бит по протоколу сообщения IEEE C37.118, информация может быть послана для оповещения, что «тревожные» значения и заранее установленные ограничения превышены для различных величин (вплоть до 16). Это делает легкой передачу данной информации по низкоскоростным каналам передачи данных, таким как релейный канал со скоростью 19.2-килобит в секунду. Таким образом, даже в случае, если существуют ограничения по пропускной способности, сообщение по протоколу IEEE C37.118 обеспечивает возможность передачи данных в реальном времени об оборудовании или оперативном состоянии на подстанции.

5.5 Размер сообщения по протоколу IEEE C37.118 и требования к хранению

Протокол сообщений IEEE C37.118 был разработан, как эффективная система передачи информации. В связи с тем, что это потоковый протокол, данные постоянно пересылаются с выбранной пользователем частотой от 1 до 60 сообщений в секунду. Комбинации данных, выбранных пользователем (векторы, аналоговые и дискретные сигналы) и частота сообщений позволяют пользователю регулировать необходимую загрузку каналов связи в соответствии с их доступностью в этом месте. Кроме того, можно определить, как передавать информацию с использованием дискретных слов в сообщениях по IEEE C37.118, что может содействовать снижению требований к пропускной способности. Если есть множество различных каналов передачи с подстанции, тогда максимум информации, посылаемый в сообщениях по IEEE C37.118 с частотой 60 сообщений в секунду обеспечивает более полную картину оперативного состояния. Скорость передачи варьируется от 9600 бит/с до 115000 бит/с или выше.

5.6 Архивирование данных в IEEE C37.118

Не все применения требуют использование сообщений IEEE C37.118 в реальном времени. Архивирование синхронизированных данных полезно для анализа после завершения события или в будущем. Это дает возможность пользователю видеть данные, привязанные ко времени со всей энергосистемы. Дополнительный последующий анализ может быть использован для уточнения или улучшения модели системы и для выявления оперативных или специфических для оборудования тенденций. Кроме того, непрерывное архивирование данных обеспечивает запись возмущений в динамике. Наконец, последовательный сбор данных о событиях и запись данных об аварии от реле и хранение этой информации позволяет

пользователям обеспечивать требование о записи полной информации о возмущениях в сети. Требования по хранению составляют от 3.2 Гб в месяц при хранении 2 векторов, 2 аналоговых сигналов и 2 дискретных и до 27.6 Гб в год при хранении 8 векторов, 4 аналоговых и 2 дискретных сигналов.

5.7 Защита данных в IEEE C37.118

Критичность данных требует, чтобы мы приняли меры к тому, чтобы данные были должным образом защищены, в соответствии с лучшей практикой компьютерной безопасности.

IEEE C37.118 определяет двоичный формат сообщений, но он не требует каких либо специфической среды или механизмов для передачи этих кадров (структур). В современной реализации используются протоколы TCP/IP, UDP/IP, и EIA-232. EIA-232 в основном используется только для связи между единичными PMU и PDC, при этом, передается небольшой объем данных. Иногда EIA-232 используется для передачи сообщений по протоколу IEEE C37.118 за пределы подстанции. Противоаварийная автоматика обычно использует IP сети для передачи синхронизированных данных, так как это снижает требования к каналам передачи данных между большим количеством PMUs или PDCs.

Проектирование соответствующей защиты критической инфраструктуры (CIP) это хорошая практика. Два аспекта учитываются при разработке плана по внедрению компьютерной защиты – это защита подстанции и защита информации.

В защите подстанции от внешних компьютерных атак лучшая практика – это построение защитного периметра вокруг компьютерной сети подстанции и тщательный контроль всех точек доступа для входа и выхода в эту сеть. Ключом к минимизации количества точек электронного доступа соответственно является минимизация точек незащищенных от внешней угрозы.

Другой лучшей практикой является использование многоуровневой архитектуры. В многослойной архитектуре все устройства, которые напрямую подключены к энергосистеме отделены от внешних точек доступа при помощи защитных уровней. Защитный слой включает передаваемые от PMU к PDC данные и посылает выходные данные PDC сквозь защищенный Ethernet шлюз (рисунк 5).

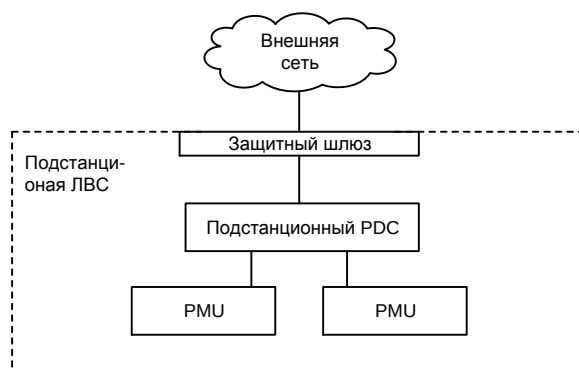


Рис. 5: Многоуровневая архитектура системы

Такая архитектура сокращает вероятность того, что хакеры получив доступ, захватят управление или изменят настройки реле или PMU. Дополнительно в этой архитектуре системы весь обмен данными происходит в первую очередь через Ethernet шлюз.

Шлюз действует как файервол (firewall) (который может быть настроен для блокировки всего трафика кроме однозначно описанного в правилах по методу блокировки по умолчанию) и как виртуальная внутренняя сеть (VPN), которая шифрует и защищает данные используемые внутри и передаваемые за пределы подстанции.

Шлюзы используются на каждом и в конце каждого канала связи для защиты информации, передаваемой по каналу между ними. Для еще большей минимизации шансов несанкционированного доступа все устройства в многослойной архитектуре должны блокировать все неиспользуемые порты и службы. Если последовательная передача

используется для отправки данных за пределы подстанции, должны быть использованы приборы для последовательного шифрования в каждом канале связи.

Другой путь для обеспечения защиты системы состоит в переводе устройств PMU и /или выходов PDC в режим однонаправленной синхронизированной передачи данных. С использованием UDP устройства PMU или PDC посылают данные, не ожидая и не принимая каких либо входных данных, что делает невозможным получение хакером доступа к PMU или PDC.

Компьютерная атака может в большей степени иметь цель получить доступ к синхронизированным данным, которые отправляются с подстанции, нежели чем внутренние данные. Поэтому очень важно надежно передать данные от подстанции конечному пользователю.

Подстанции соединены с другими подстанциями и центрами управления посредством различных каналов связи. Эти каналы могут быть или не быть в ведении оперативного персонала. Мы рекомендуем рассматривать все каналы как ненадежные. Для защиты конфиденциальности данных и их сохранности лучше передавать по каналам зашифрованные данные. Шифрование данных может быть выполнено на уровне канала передачи (с использованием устройства последовательного шифрования или устройств синхронного шифрования для оптической сети) или на уровне Интернет протокола (IP) (с использованием VPN для шифрования и защиты синхронизированных данных от остальной части направляемого сетевого потока)

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что стандарт IEEE C37.118 был разработан для измерений синхронизированных векторов и как формат сообщений для обмена данными в системах реального времени, протокол передачи может быть использован и помимо прямого применения.

Кроме того, так как протокол очень эффективен для передачи данных и не требует какой либо специфической среды передачи или механизма передачи для пересылки данных, он может быть использован в различных применениях.

- Информация, которая посылается в сообщении по IEEE C37.118 включает электрические величины и любые дискретные состояния, которые могут быть введены в реле и/или PMU
- Все данные имеют точную метку времени и включают уникальный идентификатор PMU также как ценный бит состояния, который удостоверяет, что полученные данные – верные
- В связи с тем, что IEEE C37.118 потоковый протокол, информация передается почти в реальном времени. Скорость передачи сообщений задается пользователем, позволяя согласовывать передачу данных по каналам, которые доступны.

Протокол IEEE C37.118 может быть использован для замены существующих систем сбора данных и протоколов. Используйте всю доступную информацию в сообщении по IEEE C37.118 для получения максимальной пользы из потока данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE 1344, 1995.
- [2] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE C37.118-2005, 2005.
- [3] R. Moxley, "Synchrophasors in the Real World," proceedings of the 7th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, May 2005.
- [4] A. Jarquin, E. M. Alcaraz, E. G. Alcantar, and J. L. Eternod, "Reliability Analysis for a Generation Shedding Scheme on the CFE Main Transmission Network," proceedings of the 29th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2002.
- [5] A. Johnson, R. Tucker, T. Tran, J. Paserba, D. Sullivan, C. Anderson, and D. Whitehead, "Static Var Compensation Controlled via Synchrophasors," proceedings of the 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2007.

- [6] K. Koellner, C. Anderson, and R. Moxley, "Generator Black Start Validation Using Synchronized Phasor Measurement," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
- [7] M. Mills-Price, M. Scharf, S. Hummel, M. Ropp, D. Joshi, G. Zweigle, K. G. Ravikumar, and B. Flerchinger, "Solar Generation Control With Time-Synchronized Phasors," proceedings of the 37th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2010.
- [8] D. Shi, D. J. Tylavsky, N. Logic, and K. M. Koellner, "Identification of Short Transmission-Line Parameters From Synchrophasor Measurements," proceedings of the 40th North American Power Symposium, Calgary, Canada, September 2008.
- [9] G. Benmouyal, M. B. Bryson, and C. Anderson, "Implementation of the SEL-49 Relay Line Thermal Protection in the SEL-421 Relays Using SELOGIC Equations," SEL Application Guide (AG2003-06), 2004. Available: <http://www.selinc.com>.