

Механизм отложенной передачи в системах диспетчерского контроля и управления

Д. Г. Конотол, А. Р. Стефанюк, В. П. Яхно (ООО «НПА Вира Реалтайм»)

Введение

Рассмотрим типовую схему построения SCADA¹ системы, используемую в подавляющем большинстве случаев в отечественных СДКУ:

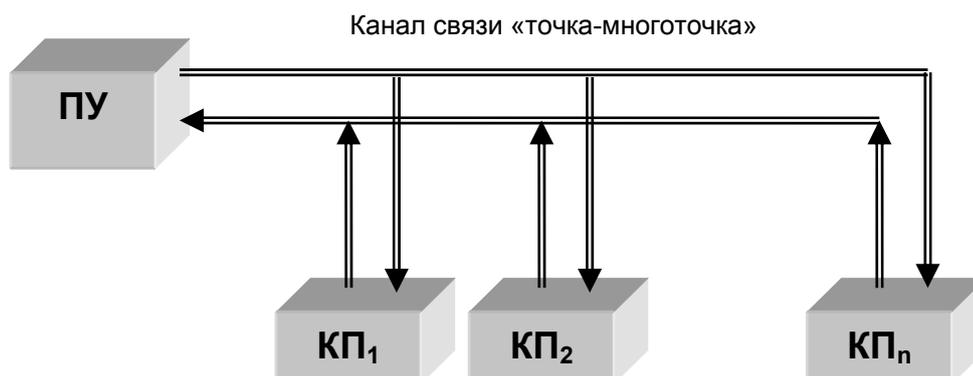


Рис. 1. Типовая схема организации связи в СДКУ.

Здесь имеется пункт управления (ПУ), связанный каналом «точка-многоточка» с несколькими контролируемыми пунктами (КП). Чаще всего, используется низкоскоростной канал тональной частоты (ТЧ) с аналоговым 4-проводным интерфейсом.

В силу особенностей используемой структуры канала связи (КП не «слышат» друг друга), в данной системе передача информации от КП к ПУ возможна только под управлением ПУ. Будем называть подобные каналы связи «каналами с управляемым доступом».

В последние годы многие организации, использующие в своей работе СДКУ, производят их модернизацию с использованием современных технологий связи, добавляя новые высокоскоростные цифровые каналы с произвольным доступом, например, с интерфейсом Ethernet и коммуникационным протоколом TCP/IP. Такие каналы, обладая большой универсальностью и пропускной способностью, могут использоваться не только для нужд телемеханики (ТМ), но и для многих других целей: систем охранного видеонаблюдения, IP-телефонии (VoIP), обеспечения доступа в Интранет/Интернет и др.

В то же время, наряду с несомненными достоинствами, подобные каналы обладают недостатком, или можно сказать – особенностью, которая заключается в том, что в силу повышенной сложности эксплуатации, большого числа

¹ SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – Система Диспетчерского Контроля и Управления (СДКУ).

взаимовлияющих настроечных параметров, интеграции в одной системе связи многих служб с весьма отличными характеристиками информационного потока и других причин – эти новые каналы связи, особенно в начальный период эксплуатации, могут работать не вполне стабильно. С точки зрения системы ТМ, это выражается в том, что информация от КП к ПУ доставляется с задержкой, которая может непредсказуемо изменяться от десятков миллисекунд до десятков секунд, то есть на три порядка! Более того, иногда связь может блокироваться вообще на период до нескольких десятков минут – и это при том, что никаких повреждений аппаратуры связи нет, и с точки зрения связистов «все работает нормально».

В силу указанных выше причин, пользователи СДКУ чаще всего оставляют старый канал связи «на всякий случай» как резервный, который должен использоваться аппаратурой ТМ при временном отсутствии основного канала.

К сожалению, даже использование нескольких каналов не дает полной гарантии наличия связи в любой момент. Чтобы не потерять информацию о событиях на КП при полном отсутствии связи, требуется хранить ее в каком-то буфере.

В связи со всем этим, перед разработчиками систем телемеханики возникают новые задачи, требующие незамедлительного решения:

- Работа по двум *разным* каналам связи.
- Автоматическое горячее резервирование.
- Минимизация времени переключения с основного канала на резервный и обратно.
- Буферизация информации на КП на случай полного отказа обоих каналов связи.

Здесь необходимо сделать некоторые пояснения.

Во-первых, с точки зрения оборудования ТМ, каналы связи являются существенно *разными*, если они используют различный интерфейс (например, аналоговый ТЧ и цифровой Ethernet) и различную процедуру передачи информации от КП к ПУ (например, опрос по каналу «точка-многоточка» и спонтанная передача по IP-каналу).

Во-вторых, минимизация времени переключения с основного канала на резервный важна по следующей причине. При традиционном подходе к процедуре такого переключения оборудованию ТМ требуется определенное *время на принятие решения* об отказе основного канала. В течение этого времени, которое обычно составляет несколько десятков секунд или даже минуты, вся система или какая-то ее часть по сути оказывается неуправляемой, несмотря на наличие работоспособного резервного канала!

1. Работа по каналам с управляемым доступом

Каналы с управляемым (детерминированным) доступом, подобные приведенному на Рис.1, многие годы применяются в системах ТМ, и не только². Особенностью

² Например, современный компьютерный интерфейс USB использует такую же схему передачи информации.

этих каналов является то, что устройство ПУ (его еще называют «Первичная станция», Master и т.п.) слышит все устройства КП («Вторичные станции», Slaves и т.п.), которые в свою очередь слышат ПУ, но не слышат друг друга. Последнее обстоятельство не позволяет использовать в данной структуре протоколы «спонтанной» передачи по инициативе КП в силу невозможности задействования механизмов предотвращения коллизий в канале связи. Поэтому эффективный обмен информацией возможен здесь только под управлением ПУ. На практике используется один из рассмотренных ниже методов, которые перечислены в порядке повышения эффективности использования канала.

1.1. Последовательный опрос (polling)

В данном методе сбор информации с КП производится путем их последовательного опроса из «центра» (ПУ). Примером такой процедуры может служить широко применяемый протокол MODBUS фирмы Modicon.

Следует подчеркнуть, что в данном случае, при каждом обращении к КП, по каналу связи передается *вся его база данных*, даже если с момента предыдущего обращения на КП ничего не произошло и передавать, по сути, ничего не нужно. Средняя задержка доставки информации о «событии» на КП в этом случае составляет очевидно половину цикла опроса и может достигать нескольких десятков секунд даже для небольшой системы – см. напр. [1]. С ростом количества КП это время линейно возрастает.

1.2. Сокращенный опрос

В этом методе ПУ периодически посылает каждому КП по очереди короткий запрос вида «есть ли у тебя новая информация?» В большинстве случаев КП отвечает тоже коротким ответом «нет ничего нового».

Поскольку полная база данных КП при этом не передается, цикл опроса и соответственно, среднее время доставки информации о важных событиях значительно сокращаются³.

В случае возникновения на КП какого-то события, он отвечает на очередной запрос из «центра» коротким ответом «Да, есть информация для передачи», после чего ПУ запрашивает и получает соответствующую информацию.

Примером процедуры сокращенного опроса может служить относительно новый протокол МЭК 60870-5-101, который в последнее время приобретает все большую популярность.

³ Это, правда, справедливо в основном для низкоскоростных каналов, точнее, для каналов с низким «битрейтом», в которых время собственно передачи информации составляет существенную часть от общего времени занятия канала, по сравнению со временем пауз, задержек переключения прием-передача, задержек в канале и т.п.

Для быстрых цифровых каналов этот выигрыш не так заметен. Например, при опросе через интерфейс RS232 на скорости 57600 бит/сек чистое время передачи 5 байт информации составляет менее 1мс., а пакета из 55 байт информации – менее 10 мс. В то же время пауза, необходимая для надежного разделения пакетов, обычно составляет 40-80 мс, то есть в несколько раз больше времени собственно передачи информации. При этом выигрыш процедуры сокращенного опроса оказывается не таким большим, как можно было бы ожидать.

К недостаткам этого протокола следует отнести то, что если на КП произошло несколько событий, и необходимо передать в «центр» значения параметров нескольких типов (дискретных, аналоговых), то для этого потребуются и столько же пар запрос-ответ, что возможно потребует гораздо большего времени, чем простой опрос всей базы данных КП в протоколе MODBUS. По этой причине использование протокола МЭК может оказаться даже менее эффективным, чем MODBUS, если события в системе ТМ происходят часто и «почти всегда» на вопрос «есть ли новая информация» КП будет отвечать положительно.

1.3. Маркерный доступ в канал

В случае возникновения на КП какого-то события, требующего передачи информации в «центр», формируется соответствующий информационный пакет, который однако не передается сразу, поскольку КП не имеет права самостоятельного доступа в канал. Вместо этого пакет помещается в специальный ТХ-буфер.

Таким образом, фактическая передача информации *откладывается* до момента, когда доступ в канал связи станет возможным. Мы будем называть это «механизмом отложенной передачи».

Первичная станция (ПУ) периодически посылает в канал широкополосный короткий пакет-маркер, содержащий номер того КП, которому в данный момент разрешается доступ в канал связи. Получив маркер, соответствующий КП отправляет в «центр» все информационные пакеты, находящиеся в его ТХ-буфере, плюс короткий пакет, информирующий ПУ об освобождении канала.

ПУ посылает новый маркер, в котором содержится номер следующего КП, которому разрешен доступ в канал. Кроме того, в этом же маркере содержится подтверждение (acknowledge) предыдущему КП об успешности приема его информации. Только получив такое подтверждение, КП удаляет информационные пакеты из ТХ-буфера. Иначе, они будут повторно переданы в следующем сеансе доступа в канал.

Данная процедура позволяет максимально эффективно использовать пропускную способность канала с детерминированным доступом (см. Рис.1), поскольку всегда от КП передается только та информация, которая требуется, причем вся сразу, без дополнительных запросов от ПУ.

Помимо этого, описанная выше организация информационного обмена позволяет естественным образом решить задачи оптимального использования резервного канала и буферизации информации на случай полного отсутствия связи – см. ниже.

Резюмируя, необходимо отметить следующие особенности каналов с управляемым (детерминированным) доступом: жесткая дисциплина в канале, отсутствие коллизий, гарантированная (хоть и довольно значительная) задержка доставки срочной информации. Задержка пропорционально зависит от количества КП в системе (см. также [1]).

2. Работа по каналам связи с произвольным доступом

Каналы с произвольным доступом, с идеологической точки зрения, представляются более прогрессивными, чем рассмотренные выше каналы с управляемым (детерминированным) доступом. Практически, это единственная возможность организовать эффективную передачу информации в большой системе. Действительно, попробуйте представить работу сети Интернет при управляемом из какого-то «центра» доступе к каналу связи!

Идея организации канала с произвольным доступом состоит в том, что канал доступен всем пользователям в любой момент, но не требуется всем одновременно.

При возникновении события на любом из КП, он самостоятельно, не дожидаясь запроса или разрешения от ПУ, выходит в канал связи и немедленно передает необходимую информацию в «центр». Задержка доставки при этом минимальна и зависит только от задержки в канале, но почти не зависит от количества КП в системе.

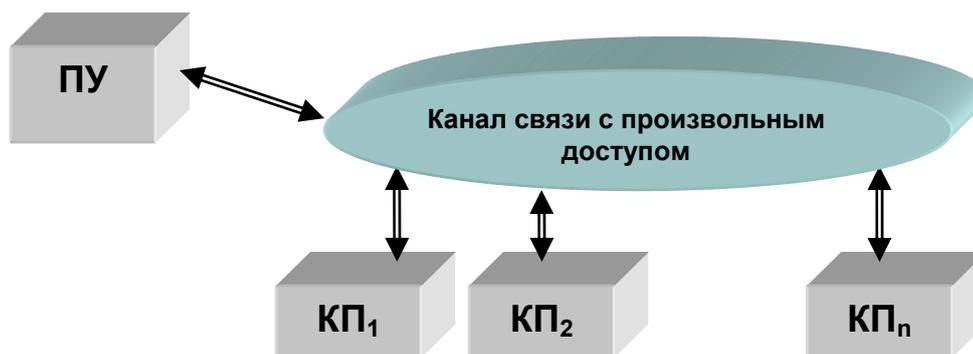


Рис. 2. Схема организации связи в СДКУ с каналом с произвольным доступом.

Очевидно, что в системе, изображенной на Рис. 2, возможны коллизии в канале связи при попытке одновременного доступа нескольких КП в канал. Для эффективной работы в такой системе используемый *протокол связи* должен содержать механизмы предотвращения коллизий, их обнаружения и преодоления.

При использовании качественного протокола связи, коллизии в канале не приводят к потерям или искажению информации. Они лишь увеличивают время доставки информации до места назначения: требуется повторная передача «столкнувшихся» пакетов – *retry*. Однако, если канал не перегружен, вероятность коллизий мала, повторная передача требуется редко и среднее время доставки информации остается гораздо более низким, чем в каналах с управляемым доступом – см. [1] и Рис. 3, взятый из работы [2].

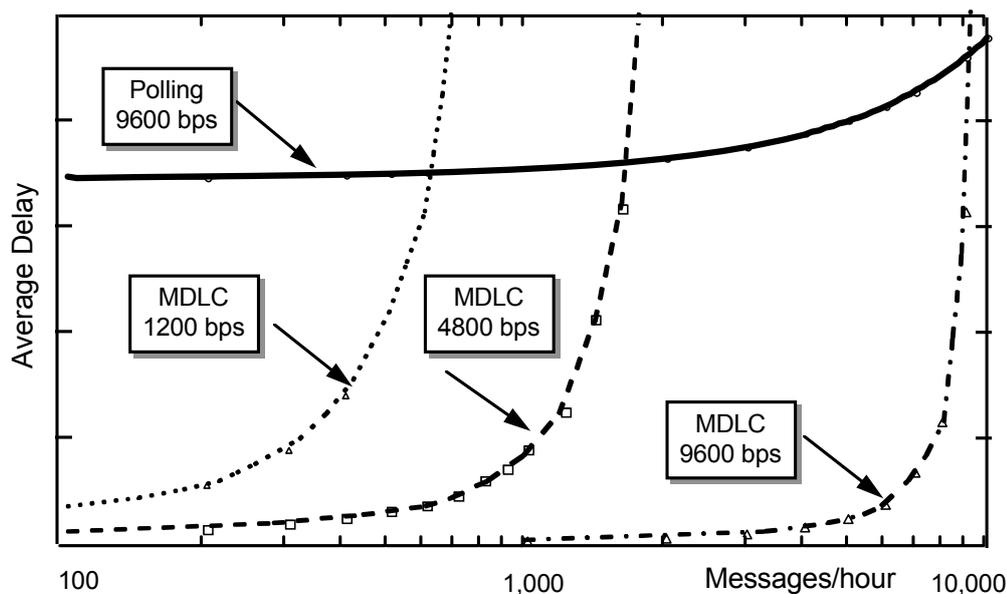


Рис 3. Средняя задержка доставки информации в каналах с произвольным (MDLC) и с управляемым (Polling) доступом, в зависимости от интенсивности потока событий в системе.

К сожалению, в настоящее время нет единого стандартного протокола, принятого всеми производителями оборудования и ПО для систем ТМ. Часто применяемые фирменные или специализированные отраслевые протоколы – MODBUS, DNP-3.0, IEC 60870-5-101 и др. – страдают существенными недостатками, препятствующими их применению в действительно больших СДКУ, содержащих многие десятки или сотни КП, десятки разнородных каналов связи и имеющих сложную сетевую организацию. По сути, все они рассчитаны только на работу в системе, имеющей структуру, показанную на Рис. 1.

Международной организацией по стандартам ISO (International Organization for Standardization, www.iso.org) еще в 1978 году была разработана и опубликована *рекомендация* по организации взаимодействия систем с открытой архитектурой от различных производителей – Open System Interconnection (OSI).

Протоколы, построенные в соответствии с рекомендациями ISO/OSI, позволяют отделить задачи обеспечения связи от приложения, использующего передачу данных. При этом разработчик прикладного ПО системы ТМ не должен заниматься такими сервисными задачами, как диагностика канала, предотвращение и преодоление коллизий, сетевая маршрутизация и т.п. Все эти функции реализуются протоколом, а программист может сосредоточиться на основных функциях прикладного ПО.

Достигается все это разделением общей задачи информационного обмена на несколько элементарных подзадач – «уровней» (layers). В соответствии с рекомендацией ISO/OSI, таких уровней должно быть семь:

Уровень (Layer)	Функции
Приложения (Application)	Передача данных: файлов, запросов, разделов БД. Обмен сообщениями. Управление. Диагностика.

Презентации (Presentation)	Преобразование формата представления данных: сжатие, скремблирование, аутентификация.
Сеанса (Session)	Обеспечение проведения нескольких сеансов связи по одному каналу одновременно: управление диалогом и синхронизация.
Транспортный (Transport)	Управление соединением. Обеспечение правильного порядка следования данных. Управление потоком, обнаружение ошибок, отправка подтверждений для «данных в целом».
Сетевой (Network)	Сетевая адресация. Маршрутизация данных. Обработка отказов и изменение маршрута. Учет динамических изменений конфигурации связи.
Канальный (Link)	Формирование пакетов для передачи в канал связи: предобработка, кодирование, контроль целостности информации. Локальная адресация. Обеспечение приоритетов доступа в канал.
Физический (Physical)	Определение электрических и механических параметров интерфейса. Обеспечение процедуры доступа в канал, предотвращение коллизий. Физическое кодирование (модуляция).

Упомянутые выше отраслевые стандартные протоколы содержат только три уровня из рекомендованных семи: физический, канальный и приложения, но не содержат, например, такого важного уровня, как сетевой, что и ограничивает их применение в системах только с простейшей структурой – см. Рис. 1.

В то же время, фирма Motorola в своих контроллерах ТМ семейства MOSCAD и в новейших ACE3600 применяет коммуникационный протокол MDLC (Motorola Data Link Communication), который был разработан ею в полном соответствии с 7-уровневой моделью ISO/OSI. Обеспечивается поддержка практически любых каналов связи: аналоговых и цифровых, быстрых и медленных, проводных и беспроводных (радио). Возможна работа как в каналах с управляемым, так и произвольным доступом, причем допускается любая комбинация таких каналов с системе и любая сетевая структура объединения этих каналов.

Эффективность протокола MDLC при работе в канале с произвольным доступом проанализирована в работе [2]. Она также подтверждена на практике многолетним опытом использования оборудования ТМ фирмы Motorola в России в самых суровых условиях эксплуатации (см. например [3]).

Рис. 3 и результаты работы [2] показывают, что каналы с произвольным доступом обеспечивают высокую эффективность связи при малых и средних нагрузках, но имеют меньшую эффективность при перегрузках, то есть при массовых коллизиях.

Здесь следует отметить, что *механизм отложенной передачи*, описанный в разделе 1.3, позволяет эффективно бороться с перегрузками каналов, возникающими в моменты пиковых нагрузок, и более того, этот механизм дает возможность в известной мере предотвращать такие перегрузки. Для этого на каждом КП (см. Рис. 2) вводится ограничение по частоте доступа в канал: не разрешается очередная передача, если с момента предыдущей прошло время

меньше заданного. Пока это время не истекло и канал недоступен, информационные пакеты хранятся в ТХ-буфере (отложенная передача).

Для саморегулирования доступа в канал связи при вышеописанном способе, каждый КП должен иметь специальный таймер, отсчитывающий время, оставшееся до окончания запрета на выход в канал. Ниже мы будем называть канал с произвольным доступом и ограничением по таймеру – «таймерным каналом связи» или «каналом с таймерным доступом».

3. Работа по двум разным каналам связи одновременно

Как было сказано во введении, при наличии в системе двух *разных* каналов связи – с управляемым и произвольным доступом (см. Рис. 4) – перед разработчиками встают задачи использования обоих этих каналов с автоматическим и как можно более быстрым переключением между ними.

Первая проблема тут – аппаратная: применяемое оборудование ТМ должно «уметь» работать как по каналам первого, так и второго типа (см. также [5]).

Вторая проблема – алгоритмическая: время принятия решения об отказе основного канала, хоть и желательно минимизировать, но нельзя сделать слишком малым. Если это время будет соизмеримо с задержками доставки информации от КП к ПУ и обратно – подтверждения от ПУ к КП, то это приведет к частым ложным тревогам и неоправданным переходам с одного канала на другой. Возможность, хоть и редких, коллизий в канале с произвольным доступом и необходимость иногда нескольких повторных передач заставляют увеличивать время принятия решения еще в несколько раз – со всеми вытекающими последствиями, описанными во введении.

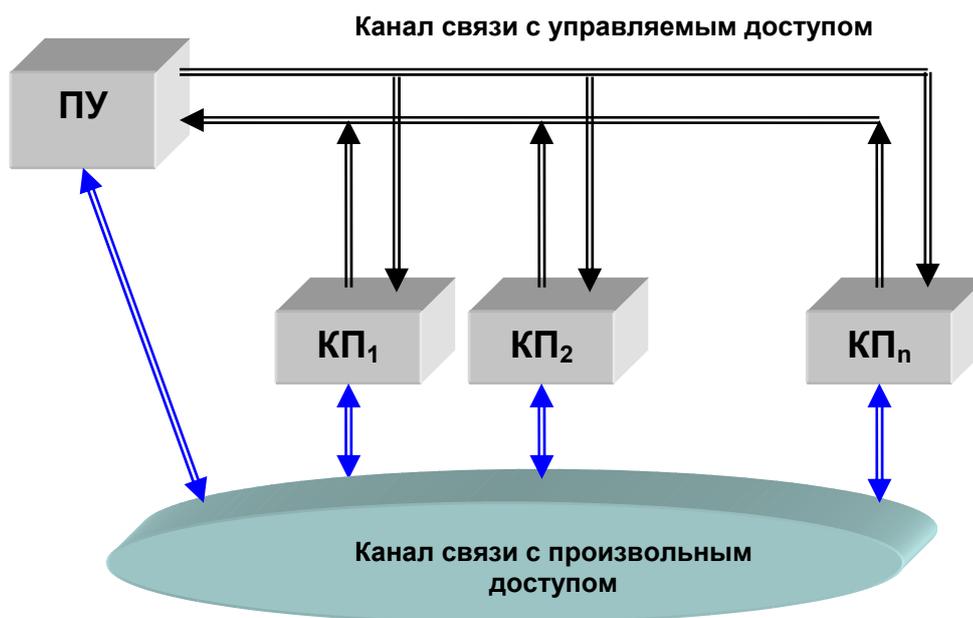


Рис. 4. Схема СДКУ с двумя разными каналами связи.

Радикально решить данную проблему можно, используя *оба канала связи одновременно*, не разделяя их на основной и резервный!

Покажем это на примере механизма отложенной передачи, описанного выше, и системы, использующей два канала связи: один с маркерным, а другой с таймерным доступом.

Пакет информации, отложенный на КП в ТХ-буфер, по истечении таймера передается в таймерный канал, но из ТХ-буфера при этом сразу не удаляется, так как возможно, потребуются его повторная передача, если в установленное время от ПУ не придет подтверждение приема (acknowledge). Если тем временем по маркерному каналу получен маркер от ПУ, разрешающий доступ в этот канал, то этот же информационный пакет будет передан и по маркерному каналу тоже.

В свою очередь ПУ, получив информационный пакет по любому из каналов, отправляет подтверждение приема на КП по тому же каналу. Если ПУ получит пакет с тем же номером второй раз – он его отбрасывает. Как только квитанция (acknowledge) от ПУ придет на КП, соответствующий информационный пакет удаляется из ТХ-буфера и больше не передается.

Таким образом, если работает только один из каналов, неважно какой, то информация будет проходить только по нему, а если работают оба, то по обоим каналам параллельно, но главным образом по тому, который быстрее – что обычно и требуется. Дублирующие пакеты отсеиваются по номеру.

Данный подход позволяет исключить процедуру перехода с основного канала на резервный и, как следствие, полностью устранить задержки, связанные с этим переходом.

Естественным образом решается при этом и задача буферизации информации на случай полного временного отсутствия связи КП с ПУ: отложенные информационные пакеты просто хранятся в ТХ-буфере до тех пор, пока связь не будет восстановлена. Здесь безусловно возникают сопутствующие проблемы, связанные с очередностью передачи информации из буфера при длительном отсутствии связи, с различным приоритетом (важностью) хранящихся данных, с необходимостью использования меток времени формирования информационных пакетов (без которых длительная буферизация вообще бессмысленна), с синхронизацией времени всех контроллеров в системе и т.д. Но это – темы отдельной публикации.

Здесь же отметим еще лишь то, что предложенный механизм использования *обоих каналов одновременно* позволяет совместить достоинства технологий управляемого и произвольного доступа: при небольших нагрузках информация передается практически немедленно по таймерному каналу, а при массовых коллизиях она буферизуется и «медленно, но верно» передается по каналу с маркерным доступом.

Идея передачи информации *по двум маршрутам одновременно* уже была реализована в СДКУ с кольцевой структурой связи – см. [4]. Однако, механизм отложенной передачи в этом проекте не использовался.

Заключение

Информационный обмен в системах диспетчерского контроля и управления (СДКУ) предлагается организовывать с использованием «механизма отложенной передачи»: при возникновении какого-то события на КП формируется соответствующий информационный пакет, содержащий метку времени, который откладывается в специальный ТХ-буфер, откуда уже и передается в «центр» по всем имеющимся каналам связи одновременно до тех пор, пока не будет получено подтверждение о приеме.

Такой способ, при наличии двух каналов – с управляемым и произвольным доступом – позволяет совместить достоинства обоих, полностью исключить задержки на переход с одного канала на другой и обеспечить буферизацию информации на период полного отказа обоих каналов связи.

Описанный в данной работе способ информационного обмена при наличии в системе ТМ двух каналов – с маркерным и таймерным доступом – был реализован в СДКУ Верхне-Волжского Управления Магистральных Нефтепроводов, и за время эксплуатации с 2005 г. на практике доказал свою эффективность.

Рис. 5 иллюстрирует работу вышеописанного алгоритма при отказе одного из двух имеющихся каналов связи. Видно, что поочередное отключение сначала таймерного (Ethernet), а затем маркерного канала не приводят даже к кратковременным перерывам в доставке информации.

Рис. 6 и 7 показывают поведение системы при отказе обоих каналов связи и последующем восстановлении одного из них – маркерного. Видно, что после восстановления связи стали поступать данные из буфера КП, и пропущенные точки синусоидальных сигналов начали появляться на графиках – справа-налево, начиная от момента восстановления канала.



Рис. 5. Работа механизма отложенной передачи при отключениях одного из двух каналов связи. Зеленая и красная линии в нижней части графиков – состояние каналов связи. Восемь синусоидальных сигналов в верхней части – значения, приходящие от КП и имитирующие изменения реальных аналоговых сигналов («телеизмерения»).

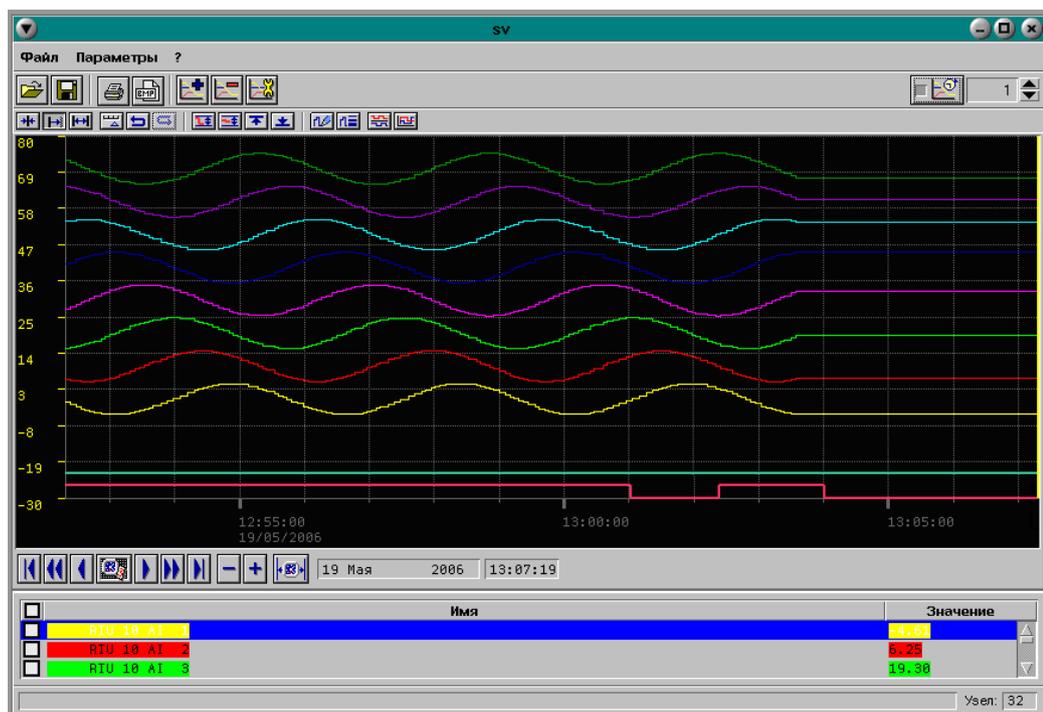


Рис. 6. Поведение системы при отказе обоих каналов связи. Графики кривых в верхней части экрана спрямляются.

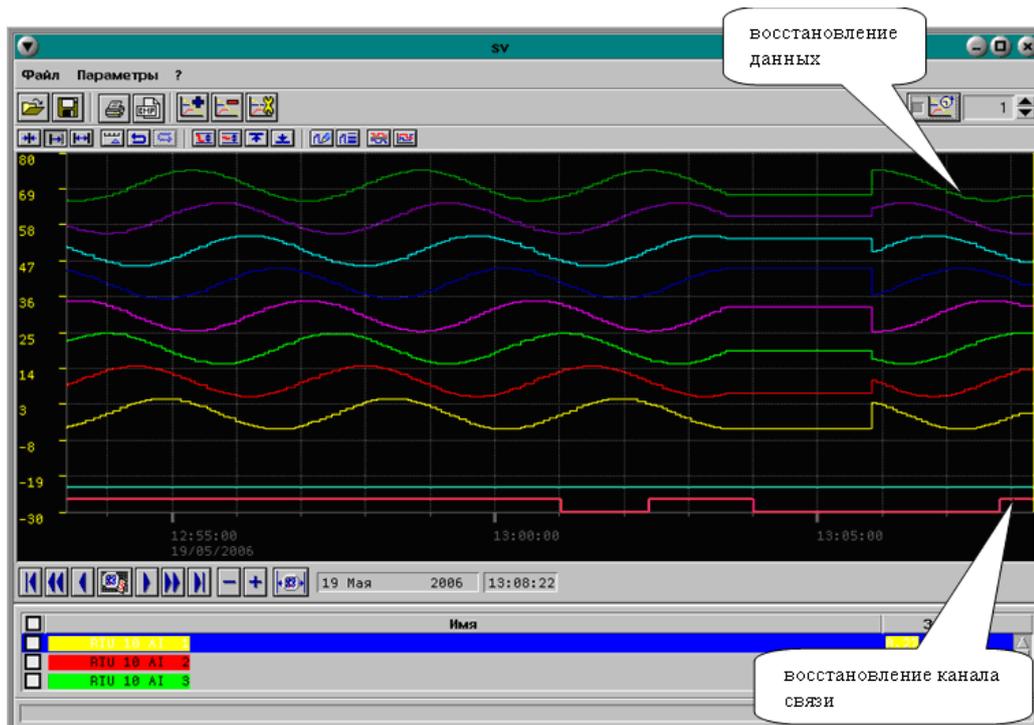


Рис. 7. Поведение системы при восстановлении одного (маркерного) канала связи после отказа обоих каналов. Ранее пропущенные точки постепенно начинают приходить и наноситься на графики.

Литература

1. А. Р. Стефанюк, В. П. Яхно. Организация сбора информации в системах диспетчерского управления сложными производственно-технологическими объектами / Международная конференция по проблемам управления (29 июня - 4 июля 1999 года): Избранные труды. Том 2 – М.: СИНТЕГ, 1999. Стр. 233-240.
2. Operating benefits achieved by use of advanced communication protocols for DA/DSM systems. Salomon Serfaty, Shlomo Scop, Dan Ehrenreich. DA/DSM Europe Conference, Vienna, Austria. October 1996.
3. Францев П. Н., Завьялов С. В., Стефанюк А. Р., Конотоп Д. Г., Косолапов А. Н., Чернов А. Е. «Автоматизация сбора информации с кустов необслуживаемых газовых скважин» – Промышленные АСУ и контроллеры, № 9, 2004, стр. 13-16.
4. Стефанюк А. Р., Бутов А. А. Система линейной телемеханики нефтепровода «Малгобек-Тихорецк» – Промышленные АСУ и контроллеры, №1, 2007, стр. 14-16.
5. Стефанюк А.Р., Яхно В.П. Выбор аппаратно-программных средств для управления крупномасштабными системами. / Труды Первой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2007, (1-3 октября 2007 г., Москва, Россия, ИПУ РАН), Стр. 270-275.

*Анатолий Романович Стефанюк – к.ф.-м.н., начальник отдела,
 Давид Григорьевич Конотоп – главный специалист,
 Виктор Павлович Яхно – к.т.н., ведущий инженер*

ООО «НПА Вира Реалтайм», Москва
Тел. +7 495 742 6880