

СЕКЦИЯ 11

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ДРУГИМИ ОБЪЕКТАМИ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РЕТРАНСЛЯЦИИ ДАННЫХ В АСУ ТП АЭС

Бывайков М.Е.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
lab31.5@mail.ru

Аннотация. Рассматривается ретрансляция информации, которой обмениваются системы различных уровней АСУ ТП АЭС. Для решения этой задачи предлагается использовать цифровые двойники программно-технических средств АСУ ТП АЭС – ретрансляторы, связывающие системы различных уровней.

Ключевые слова: атомная электростанция (АЭС), автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП), ретрансляция данных, цифровые двойники программно-технических средств.

Введение

В современных компьютерных технологиях широко применяются цифровые двойники, которые функционально заменяют штатные программно-технические средства. В автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС) цифровые двойники также широко применяются [1-7].

В программно-технических средствах обмена информацией между системами различных уровней АСУ ТП АЭС, необходимо выполнять ретрансляцию информации – прием информации от системы одного уровня и передачу информации в систему другого уровня в условиях, когда передача информации напрямую из одной системы в другую невозможна. В данной работе для решения этой задачи предлагается использовать ретрансляторы – цифровые двойники различных элементов программно-технических средств применительно к АСУ ТП АЭС, в системе верхнего уровня которой используется программный продукт [8, 9], созданный в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Эти ретрансляторы информации используются в АСУ ТП энергоблоков АЭС «Бушер» (Иран) и «Куданкулам» (Индия).

1. Использование ретрансляторов для обмена информацией между системой верхнего (блочного) уровня и системами нижнего уровня АСУ ТП АЭС

Для обмена информацией между системой верхнего (блочного) уровня [8, 9] и системами нижнего уровня [10, 11] АСУ ТП АЭС используются шлюзы [12], программно-технические средства которых входят в состав комплексов программно-технических систем нижнего уровня.

В системах верхнего (блочного) уровня АСУ ТП функции обмена данными с системами нижнего уровня выполняют программно-технические средства серверов верхнего уровня.

Если программное обеспечение шлюза имеет ограничение на количество серверов системы верхнего (блочного) уровня, с которыми шлюз может открыть каналы связи для обмена данными, и количество серверов превышает это ограничение, то для реализации требуемого количества каналов связи применяются ретрансляторы данных. Программное обеспечение этих ретрансляторов устанавливается на технических средствах серверов верхнего (блочного) уровня.

На рис. 1 представлена схема обмена данными между M серверами системы верхнего (блочного) уровня АСУ ТП АЭС и программно-техническими средствами систем нижнего уровня с использованием N шлюзов.

Каждый ретранслятор обменивается данными:

- с интерфейсным программным обеспечением (ПО) соответствующего шлюза;
- с программным обеспечением серверов системы верхнего (блочного) уровня.

Этот обмен данными программное обеспечение ретрансляторов выполняет по тому же протоколу и алгоритмам, которые программное обеспечение серверов системы верхнего (блочного) уровня использует для обмена данными с интерфейсным программным обеспечением шлюзов.

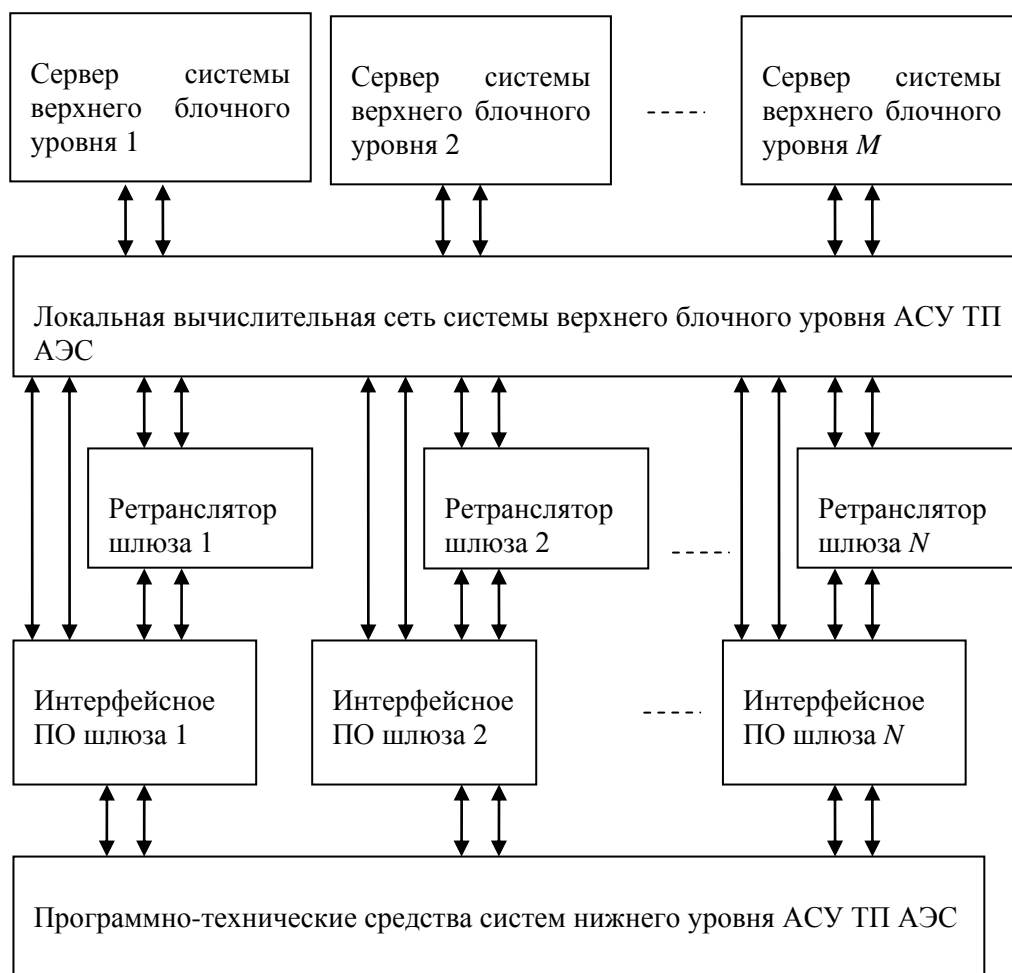


Рис. 1. Схема применения ретрансляторов для обмена информацией между системой верхнего (блочного) уровня и системами нижнего уровня АСУ ТП АЭС

Для обмена информацией между системой верхнего (блочного) уровня и системами нижнего уровня могут использоваться каналы связи:

- прямые каналы связи, когда автоматизированный контроль и управление выполняются для одних и тех же технологических процессов подсистем энергоблока АЭС как для системы верхнего (блочного) уровня, так и для соответствующих систем нижнего уровня;
- перекрестные каналы связи, когда автоматизированный контроль и управление выполняются для разных технологических процессов подсистем энергоблока АЭС применительно к системе верхнего (блочного) уровня и применительно к соответствующим системам нижнего уровня.

Например, прямым является канал связи между подсистемой контроля и управления реакторным отделением в составе системы верхнего (блочного) уровня и подсистемой контроля и управления реакторного отделения в составе соответствующей системы нижнего уровня. Перекрестным является канал связи между подсистемой контроля и управления реакторным отделением в составе системы верхнего (блочного) уровня и подсистемой контроля и управления турбинного отделения в составе соответствующей системы нижнего уровня.

В прямых связях серверы верхнего блочного уровня обмениваются данными со шлюзами напрямую без использования ретрансляторов, поскольку небольшое количество прямых связей не превышает ограничение на количество серверов системы верхнего блочного уровня, с которыми шлюз может открыть каналы связи для обмена данными. Если количество серверов превышает это ограничение, то применяются цифровые двойники-ретрансляторы в перекрестных каналах связи.

В целях обеспечения надежности каналов обмена информацией системы верхнего (блочного) уровня с системами нижнего уровня применяется резервирование:

- основные и резервные серверы верхнего (блочного) уровня;
- основные и резервные шлюзы;
- основные и резервные ретрансляторы;
- основная и резервная локальная вычислительная сеть системы верхнего (блочного) уровня с подключенными к ней шлюзами систем нижнего уровня.

При прямом канале связи программное обеспечение сервера системы верхнего (блочного) уровня устанавливает каналы обмена информацией как с основным, так и с резервным шлюзами. При перекрестном канале связи с применением ретранслятора программное обеспечение сервера устанавливает каналы обмена информацией как с основным, так и с резервным ретрансляторами, которые устанавливают каналы обмена информацией как с основным, так и с резервным шлюзами.

2. Применение ретрансляторов при обмене информацией между системами нижнего уровня АСУ ТП АЭС

Программно-технические средства шлюзов, входящих в состав систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС, могут получать информацию от шлюзов других систем нижнего уровня через локальную вычислительную сеть системы верхнего (блочного) уровня с использованием программ приема данных, выполняющих функцию ретрансляторов при обмене информацией между системами нижнего уровня АСУ ТП АЭС.

На рис. 2 представлена структура обмена информацией между интерфейсным ПО N шлюзов систем нижнего уровня через локальную вычислительную сеть системы верхнего (блочного) уровня АСУ ТП АЭС.

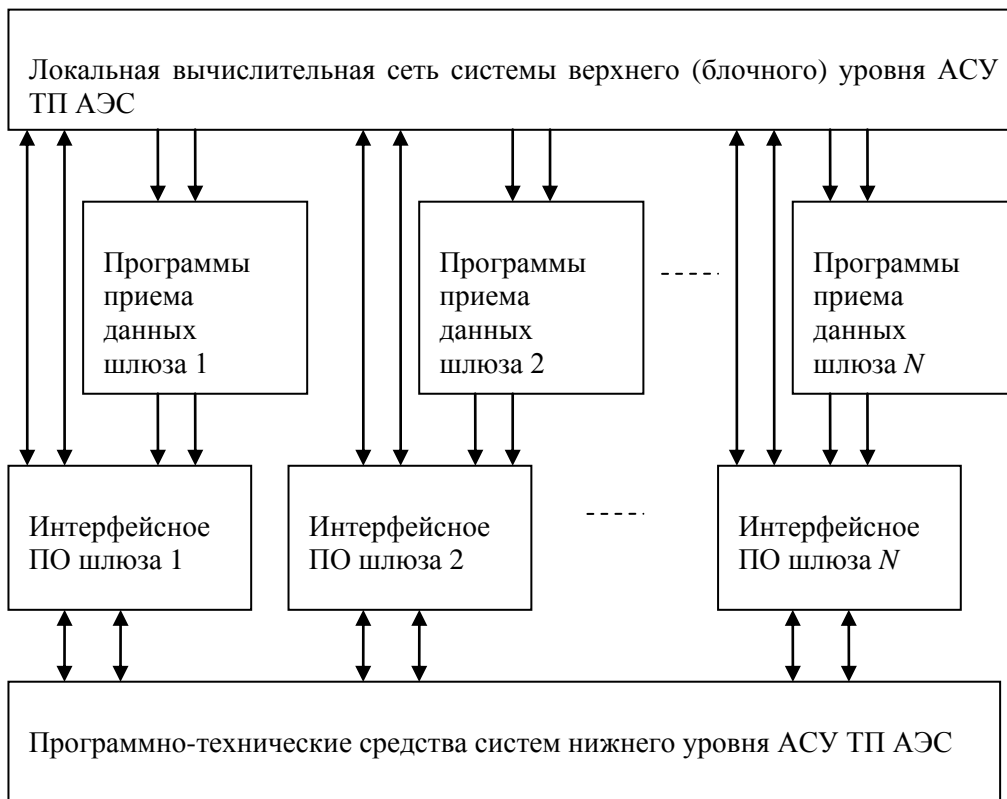


Рис. 2. Структура применения программ приема данных при обмене информацией между системами нижнего уровня с использованием локальной вычислительной сети системы верхнего (блочного) уровня АСУ ТП АЭС

Программы приема данных получают информацию от интерфейсного ПО шлюзов других систем нижнего уровня, используя тот же протокол обмена данными, который применяется при обмене информацией между ПО серверов системы верхнего (блочного) уровня и интерфейсным ПО шлюзов. Количество программ приема данных на конкретном программно-техническом средстве шлюза устанавливается в соответствии с количеством связей этой системы нижнего уровня с другими системами нижнего уровня. Программы приема данных получают информацию от интерфейсного ПО шлюзов других систем нижнего уровня в объеме, который запроектирован в АСУ ТП АЭС.

В целях обеспечения надежности каналов обмена информацией между системами нижнего уровня применяется резервирование:

- программы приема данных устанавливаются как на основном, так и на резервном шлюзе системы нижнего уровня;
- связь устанавливается, как с основным, так и с резервным шлюзами других соответствующих систем нижнего уровня;
- применяются как основная, так и резервная локальные вычислительные сети системы верхнего (блочного) уровня.

3. Применение ретрансляторов при передаче информации из систем верхнего (блочного) уровня в систему верхнего (общего станционного) уровня АСУ ТП АЭС

Если АЭС включает несколько энергоблоков, то соответствующее АСУ ТП может включать систему верхнего (общего станционного) уровня, которая получает информацию от систем верхнего (блочного) уровней отдельных энергоблоков АЭС для контроля интегрального состояния технологических процессов АЭС.

Серверы системы верхнего (общего станционного) уровня получают данные через локальную вычислительную сеть системы верхнего (общего станционного) уровня, для связи которой с локальными вычислительными сетями систем верхнего (блочного) уровня применяются блочные ретрансляторы, которые включены в АСУ ТП отдельного энергоблока АЭС.

На рис. 3 представлена структура передачи информации из ПО систем нижнего уровня в ПО К серверов системы верхнего (общего станционного) уровня АСУ ТП АЭС с использованием N блочных ретрансляторов, каждый из которых соответствует одному из шлюзов систем нижнего уровня одного из энергоблоков АЭС.

Каждый блочный ретранслятор обменивается данными:

- с интерфейсным ПО соответствующего шлюза;
- с программным обеспечением серверов системы верхнего (общего станционного) уровня.

Этот обмен данными программное обеспечение блочных ретрансляторов выполняет по тому же протоколу и алгоритмам, которые программное обеспечение серверов системы верхнего (блочного) уровня использует для обмена данными с интерфейсным ПО шлюзов.

Блочные ретрансляторы выполняют обмен информацией между системой верхнего (общего) станционного уровня и системами нижнего уровня энергоблоков АСУ ТП АЭС в условиях независимости локальных вычислительных сетей систем верхнего (блочного) и верхнего (общего станционного) уровней.

Безопасность управления энергоблоками АЭС обеспечивается:

- независимостью локальных вычислительных сетей систем верхнего (блочного) и верхнего (общего станционного) уровней АСУ ТП АЭС;
- выполнением системой верхнего (общего станционного) уровня только информационных функций (отсутствием функций управления энергоблоками АЭС).



Рис. 3. Структура применения блочных ретрансляторов при передаче информации из систем верхнего (блочного) уровня в систему верхнего (общего станционного) уровня АСУ ТП АЭС

4. Применение ретрансляторов при передаче информации из АСУ ТП АЭС в кризисные центры

Для устранения аварийных ситуаций, которые могут случиться с энергоблоками АЭС, запроектированы кризисные центры, в которые должна поступать информация от систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС. Кризисные центры могут входить в состав АСУ ТП АЭС (локальные кризисные центры) или быть удаленными по отношению к АСУ ТП АЭС (размещаться в другом национальном регионе).

На рис. 4 представлена структура передачи информации из ПО систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС в ПО L серверов локальных кризисных центров и в ПО P серверов удаленных кризисных центров с использованием N блочных и обще-станционных ретрансляторов, каждый из которых соответствует одному из шлюзов систем нижнего уровня соответствующего энергоблока АЭС.

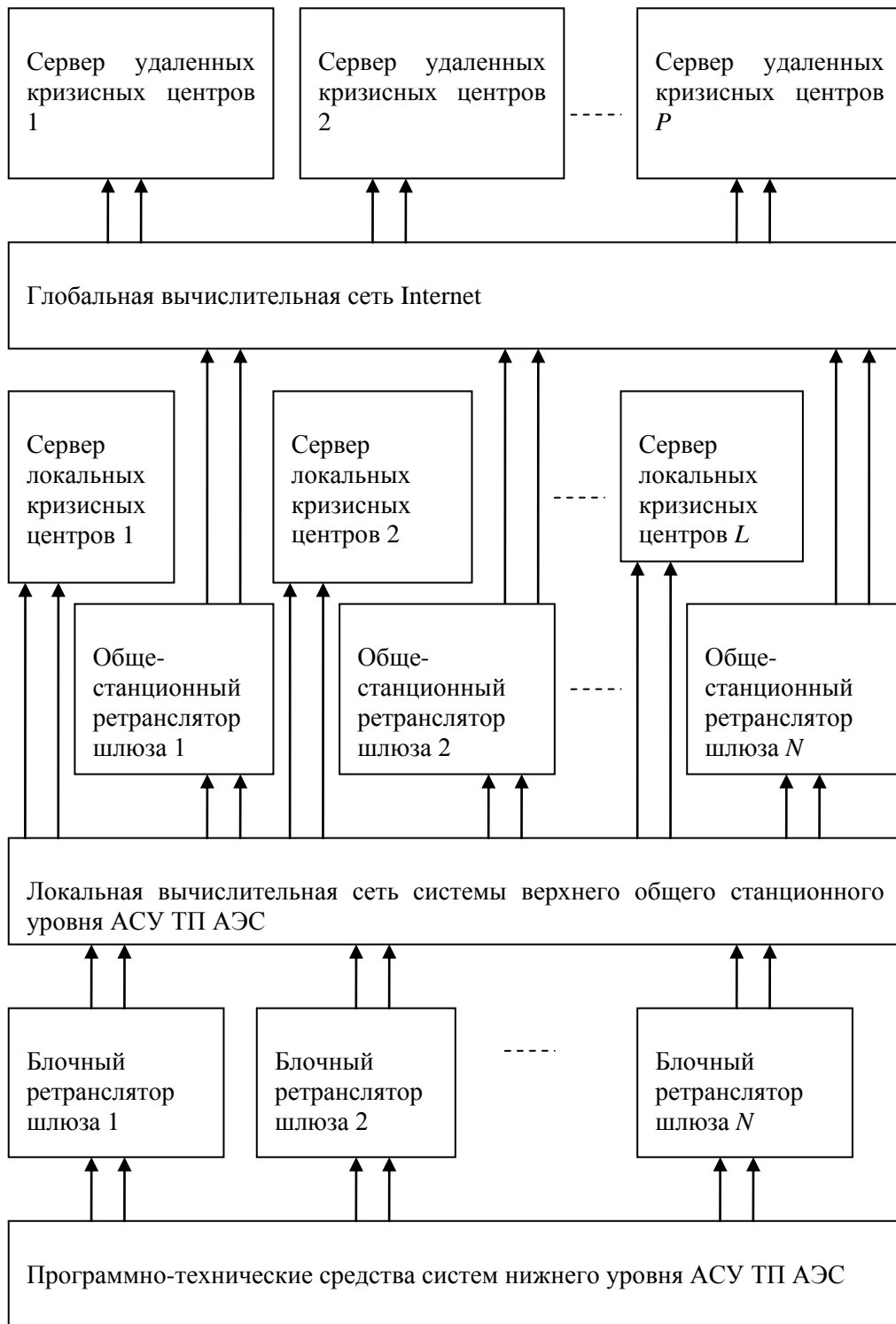


Рис. 4. Структура применения блочных и обще-станционных ретрансляторов при передаче информации из систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС в локальные и удаленные кризисные центры

Программное обеспечение каждого обще-станционного ретранслятора обменивается данными:

- с программным обеспечением соответствующего блочного ретранслятора шлюза одного из энергоблоков АЭС;
- с программным обеспечением серверов локальных и удаленных кризисных центров.

Этот обмен данными программное обеспечение обще-станционных ретрансляторов выполняет по тому же протоколу и алгоритмам, которые программное обеспечение серверов системы верхнего (блочного) уровня использует для обмена данными с интерфейсным ПО шлюзов.

Безопасность управления энергоблоками АЭС обеспечивается:

- независимостью локальных вычислительных сетей систем верхнего (общего станционного) и верхнего (блочного) уровней АСУ ТП АЭС от глобальной вычислительной сети Internet;

- отсутствием функций управления энергоблоком АЭС в программном обеспечении локальных и удаленных кризисных центров, которые выполняют только информационные функции.

Для выполнения требований защиты от несанкционированного доступа из глобальной вычислительной сети Internet в локальные вычислительные сети АСУ ТП АЭС на аппаратном уровне применяются диоды данных, передающих информацию только в одном направлении – из АСУ ТП АЭС в удаленные кризисные центры. Функции, выполняемые обще-станционными ретрансляторами, включают передачу данных через диоды данных.

5. Настройка ретрансляторов данных в АСУ ТП АЭС

Алгоритмы передачи данных через ретрансляторы систем различных уровней АСУ ТП АЭС, аналогично алгоритмам передачи данных через шлюзы [12] систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС, можно описать, используя термин сигнала – элемента данных, включающего атрибуты:

- текущее значение одного из параметров технологических процессов АЭС;
- момент времени последнего изменения этого параметра;
- признаки недостоверности этого параметра.

Сигналы передаются через ретрансляторы в соответствии с алгоритмом «информация об обновлениях сигналов в ответ на запрос»:

- ретранслятор в цикле работы посылает шлюзу или ретранслятору более низкого уровня запросы на получение сигналов, атрибуты которых обновились после предыдущего запроса;
- в ответ на запрос информации от сервера или ретранслятора более высокого уровня ретранслятор посылает информацию о сигналах, изменившихся с момента времени предыдущего запроса.

Очередной запрос изменившихся сигналов посылается после получения ответа на предыдущий запрос данных.

Для передачи данных через ретрансляторы применяются:

- массивы данных, которые содержат текущую информацию об атрибутах сигналов;
- архивные кольцевые буферы данных, используемые в случаях, когда технические ресурсы ретранслятора не позволяют передать поток текущих сигналов.

Выполнение требования передачи данных через ретранслятор без потерь через ретранслятор зависит от потока сигналов, который измеряется в виде количества сигналов, передаваемых за единицу времени. При работе энергоблока АЭС на проектной мощности (при плановых потоках сигналов) передача сигналов через ретрансляторы должна выполняться в основном через массивы текущих данных, с редким использованием архивных кольцевых буферов данных. При переходных технологических процессах, например, при плановом пуске/останове энергоблока АЭС или при аварийных случаях, могут наблюдаться пиковые потоки сигналов, при которых для выполнения требования передачи данных через ретранслятор без потерь применяются архивные кольцевые буферы данных.

Настройка ПО ретрансляторов должна включать установку размеров массивов текущих данных и размеров архивных кольцевых буферов данных.

Размеры массивов текущих данных для ретрансляторов должны быть не менее, чем те же настройки в ПО соответствующего шлюза системы нижнего уровня. Размеры архивных кольцевых буферов данных для ретрансляторов должны обеспечивать передачу сигналов через ретранслятор без переполнения этих буферов при пиковых потоках сигналов.

Для одного из ретрансляторов обозначим:

Q – суммарное количество сигналов для конкретного ретранслятора, совпадающее с количеством сигналов для соответствующего шлюза;

D – максимальное время между ответными посылками сигналов с изменившимися атрибутами из шлюза или ретранслятора более низкого уровня в этот ретранслятор в ответ на его запросы информации;

R_0 – плановый поток сигналов, передаваемых через этот ретранслятор при работе энергоблока АЭС на номинальной мощности;

R_j – расчетный поток сигналов, передаваемых через этот ретранслятор при переходном технологическом процессе энергоблока АЭС с номером j ($j = 1, 2 \dots J$);

T_j – максимально возможная длительность переходного технологического процесса энергоблока АЭС с номером j (в единицах времени);

S – размер архивного кольцевого буфера данных для этого ретранслятора, измеряемый в количестве сигналов, которые можно хранить в этом буфере.

Сигналы будут передаваться через этот ретранслятор с применением только массивов текущих данных без использования архивных кольцевых буферов при условии:

$$Q/D \geq \max_{j=1,2,\dots,J} R_j \quad (1)$$

Сигналы будут передаваться через этот ретранслятор без потерь информации с применением архивных кольцевых буферов данных при условии:

$$S \geq \max_{j=1,2,\dots,J} ((R_j - R_0)T_j) \quad (2)$$

6. Заключение

В данной работе рассмотрено применение ретрансляторов – цифровых двойников при обмене информацией между системами различных уровней АСУ ТП АЭС. С использованием ретрансляторов предложены методы, схемы и алгоритмы обмена информацией.

Предложенные методы, схемы и алгоритмы ретрансляции данных могут быть использованы не только в системах АСУ ТП АЭС различных уровней, а также в автоматизированных системах контроля и управления другими большими промышленными объектами.

Литература

1. *Полетыкин А.Г., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Промыслов В.Г.* Новое поколение систем верхнего уровня и концепция Industry 4.0 // *Материалы Десятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2017.* – М.: ИПУ РАН, 2017. – Т. 1. – С. 101–107.
2. *Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Степанов В.Н.* Технология распределенной разработки ПО для АСУ ТП АЭС с использованием виртуализации и цифровых двойников // *Труды 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2021).* – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 98–102.
3. *Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф.* Применение цифрового двойника в жизненном цикле АСУ ТП АЭС // *Материалы 2-й Международной научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, 2021).* – Минск: БГУИР, 2021. – С. 193–197.
4. *Полетыкин А.Г.* Виртуальная суперкомпьютерная модель для сопровождения и модернизации сложных систем управления в атомной энергетике // *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва).* – М.: ИПУ РАН, 2018. – Т. 2. – С. 465–470.
5. *Жарко Е.Ф.* Цифровой двойник технологического процесса энергоблока АЭС // *Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2022).* – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1053–1059.
6. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Развитие импортонезависимой элементной базы для поддержки технологий «цифровых двойников» (на примере задач АСУ ТП АЭС) // *Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022).* – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1060–1067.
7. *Бывайков М.Е.* Применение цифровых двойников систем АСУ ТП на этапе заводских испытаний // *Труды 16-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023).* – М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 1184–1190.
8. *Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // *Автоматика и Телемеханика.* – 2006. – № 5. – С. 65–79.
9. *Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Зуенков М.А., Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г. и др.* Комплекс работ по созданию первой управляющей системы верхнего блочного уровня АСУ ТП для АЭС "Бушер" на основе отечественных информационных технологий [Электронный ресурс]: монография. – М.: ИПУ РАН, 2013. – ISBN 978-5-91450-130-0.
10. *Бармаков Ю.Н.* Средства автоматизации, разрабатываемые ВНИИА в рамках программы развития атомной энергетики России // *Автоматизация в промышленности.* – 2006. – № 8. – С. 49–51.
11. *Мирошник Ю.М., Овчинников В.Н., Пелеганчук Ю.И., Пронякин А.В., Семичастнов В.О., Фельдман М.Е., Шермаков В.Е.* Управляющая система безопасности АЭС // *Ядерные измерительно-информационные технологии.* – 2004. – № 1. – С. 17–29.
12. *Бывайков М.Е., Полетыкин А.Г., Степанов В.Н., Сахабетдинов И.У.* Программный интерфейс между верхним и нижним уровнями автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомной электростанции (АЭС) [Электронный ресурс]: монография. – М.: ИПУ РАН, 2021. – ISBN 978-5-91450-254-3.