



ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ ПРОТОКОЛ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ TSNET ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ

М.С. Скворцов (АО «СПИК СЗМА»)

Рассмотрена структура стандартов, описывающих протоколы для промышленных сетей, реализованных на базе протокола Ethernet. Описан коммуникационный профиль протокола TSNet. Приведены основные особенности реализации протокола, заключающиеся в использовании детерминированного упорядоченного множественного метода доступа (DOMA) к среде передачи, применяемого на канальном уровне и общей разделяемой памяти сети, реализованной на прикладном уровне. Указаны основные технические характеристики сети TSNet.

Ключевые слова: промышленные сети реального времени, коммуникационные профили и протоколы, протокол TSNet, детерминированный упорядоченный множественный доступ, общая память сети.

Введение

В промышленной автоматизации происходит постоянное усложнение систем управления, они становятся все более территориально-распределенными. Возрастает число интеллектуальных датчиков, приводов, устройств, и соответственно увеличивается объем передаваемых данных.

В настоящее время традиционные полевые шины активно вытесняются полевыми шинами, основанными на протоколах Real-Time Ethernet. Несмотря на широкое распространение протокола Ethernet в различных сетях передачи данных, в промышленности до недавнего времени применение протокола Ethernet было сравнительно ограничено. Причиной этого является один из недостатков сетей Ethernet, а именно невозможность функционирования в так называемом режиме реального времени.

Работа в режиме реального времени не обязательно означает повышенное быстродействие, но гарантирует выполнение задачи за жестко заданный промежуток времени. Таким образом, под промышленной сетью реального времени понимается сеть передачи данных, в которой гарантируется доставка пакета данных от отправителя до получателя за строго заданный период времени.

Ряд протоколов, базирующихся на Ethernet, несмотря на возможность работы на высоких скоростях (Fast Ethernet — 100 Мбит/с, Gigabit Ethernet — 1 Гбит/с), не поддерживают режим реального времени. Причина кроется внутри протокола IEEE 802.3, в котором используется метод доступа CSMA/CD (множественный доступ с контролем несущей и определением коллизий), определяющий поведение узлов сети при отправке/приеме данных. Начать передачу данных конкретный узел сети может только когда дожидается завершения передачи данных другими узлами. Ос-

новным достоинством метода CSMA/CD является автоматическая регулировка загруженности канала связи. При возрастании нагрузки увеличивается число коллизий, и вслед за этим увеличивается интервал задержки. Интервал ожидания является произвольной величиной и зависит от множества причин. Именно этот интервал времени является основным недостатком, недопустимым для работы в режиме реального времени. В результате этого рассчитать гарантированное время цикла передачи данных не представляется возможным.

Основным решением, позволяющим сетям Ethernet работать в реальном времени, является введение дополнительного механизма, исключающего возникновение коллизий. Поэтому во всех протоколах Real-Time Ethernet (протоколах реального времени, основанных на Ethernet) так или иначе эта проблема решена [1].

Стандарты промышленных сетей

К настоящему моменту существует множество протоколов передачи данных, работающих в реальном времени и основанных на Ethernet, которые используются в промышленной автоматизации. Основные протоколы входят в международные стандарты IEC 61784 «Промышленные сети. Профили» и IEC 61158 «Сети для передачи производственных данных. Спецификации полевых шин».

Стандарт IEC 61158 использует принципы и методологию базовой эталонной модели взаимодействия открытых сетей OSI, состоящей из семи уровней. Отличие заключается в том, что функции промежуточных уровней модели OSI, а именно с третьего по шестой, могут быть реализованы на канальном уровне (уровень два) или на прикладном уровне приложения (уровень семь). На рис. 1 представлена базовая модель промышленной сети, приведенная в стандарте IEC 61158-1.

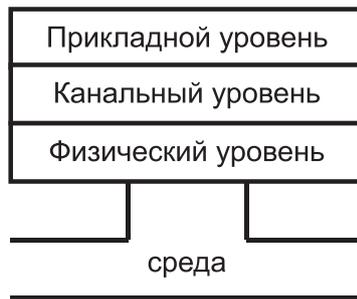


Рис. 1. Базовая модель промышленной сети (IEC 61158-1)

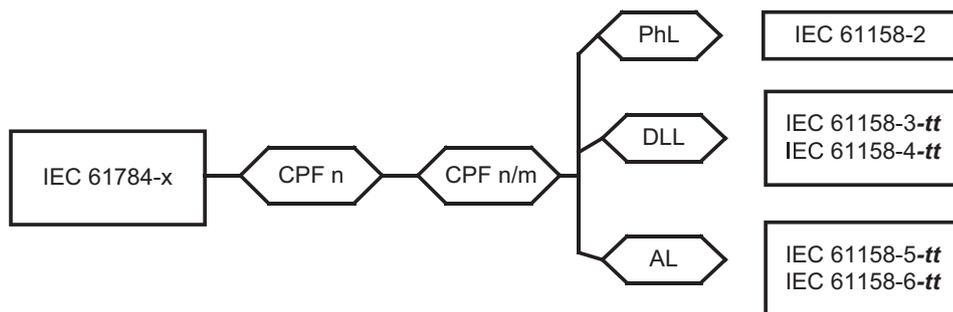


Рис. 2. Взаимосвязь IEC 61784 / IEC 61158 с семействами коммуникационных профилей и коммуникационных протоколов

Стандарт IEC 61784 содержит описания семейств коммуникационных профилей (CPF), каждый из которых определяет один или несколько коммуникационных протоколов (CP). Стандарт IEC 61784-1 описывает «традиционные» промышленные сети, физический уровень которых основан на RS-485. Стандарт IEC 61784-2 описывает промышленные сети, физический уровень которых основан на ISO/IEC 8802-3 (Ethernet). Третья часть стандарта IEC 61784-3 относится к функционально безопасным полевым шинам, которые могут применяться

в системах противоаварийной защиты (рис. 2).

Более подробное описание протоколов приводится в семействе стандартов IEC 61158. Физический уровень коммуникационного протокола (PhL) приводится в IEC 61158-2, описание канального уровня протокола (DLL) в IEC 61158-3-tt и IEC 61158-4-tt, описание уровня приложения (AL) в IEC 61158-5-tt и IEC 61158-6-tt. Необходи-

мо заменить -tt на соответствующий номер семейства коммуникационного профиля из IEC 61784.

### Протокол TCnet

TCnet — это промышленный протокол на базе Ethernet, разработанный компанией Тошиба и включенный в стандарт IEC 61784-2 «Промышленные сети. Профили. Часть 2. Дополнительные профили полевой (магистральной) шины для сетей, работающих

Таблица 1. Соотношение семейств коммуникационных профилей и коммуникационных протоколов

Семейства коммуникационных профилей (CPF) IEC 61784			Соответствие коммуникационного протокола (CP) номеру типа промышленной полевой шины IEC 61158		
CPF	Название	Том	Номер и название CP	Номер типа	Том
1	FOUNDATION Fieldbus	1, 3	CP 1/1 Foundation H1	1, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1, 3	CP 1/1 Foundation HSE	5	1, 5, 6
		1, 3	CP 1/1 Foundation H2	1, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6
2	CIP	1	CP 2/1 ControlNet	2	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1, 2, 3	CP 2/2 EtherNet/IP	2	1, 4, 5, 6
		1, 3	CP 2/3 DeviceNet	2	1, 4, 5, 6
3	PROFIBUS и PROFINET	1, 3	CP 3/1 Profibus DP	3	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1, 3	CP 3/2 Profibus PA	3	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2, 3	CP 3/4 Profinet IO CC-A	10	1, 5, 6
		2, 3	CP 3/5 Profinet IO CC-B	10	1, 5, 6
		2, 3	CP 3/6 Profinet IO CC-C	10	1, 5, 6
4	P-NET	1	CP 4/1 P-NET RS-485	4	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2	CP 4/2 P-NET on IP	4	1, 3, 4, 5, 6
5	WorldFIP	1	CP 5/1 WorldFIP	7	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1	CP 5/2 WorldFIP with subMMS	7	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1	CP 5/3 WorldFIP min for TCP/IP	7	1, 2, 3, 4, 5, 6
6	INTERBUS	1, 3	CP 6/1 INTERBUS	8	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1, 3	CP 6/2 INTERBUS TCP	8	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1, 3	CP 6/3 INTERBUS subset CP 6/1	8	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2	CP 6/4, CP 6/5, CP 6/6	8	1, 2, 3, 4, 5, 6
8	CC-Link	1, 3	CP 8/1 CC-Link/V1	18	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1	CP 8/2 CC-Link/V2	18	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1	CP 8/3 CC-Link/LT	18	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2	CP 8/4 CC-Link/IE Controller Network	23	1, 5, 6
		2	CP 8/5 CC-Link/IE Field Network	23	1, 5, 6
9	HART	1	CP 9/1 HART	20	1, 2, 3, 4, 5, 6
		-	CP 9/2 WirelessHART	20	See IEC62591
10	Vnet/IP	2	CP 10/1 Vnet/IP	17	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2	CP 11/1 TCnet -star	11	1, 2, 3, 4, 5, 6
11	TC-net	2	CP 11/1 TCnet -loop 100	11	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2	CP 11/1 TCnet -loop 1G	11	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2, 3	CP 12/1	12	1, 2, 3, 4, 5, 6
12	EtherCAT	2, 3	CP 12/2	12	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2, 3	CP13/1 Powerlink	13	1, 3, 4, 5, 6
15	MODBUS -RTPS	2	CP 15/1 Modbus TCP	15	1, 5, 6
		2	CP 15/2 RTPS	15	1, 5, 6
16	SERCOS	1	CP 16/1 SERCOS I	16	1, 2, 3, 4, 5, 6
		1	CP 16/1 SERCOS II	16	1, 2, 3, 4, 5, 6
		2, 3	CP 16/1 SERCOS III	19	1, 2, 3, 4, 5, 6
17	RAPIenet	2	CP 17/1 RAPIenet	21	1, 3, 4, 5, 6
		2, 3	CP 18/1 SafetyNET p RTFL	22	1, 3, 4, 5, 6
18	SafetyNet p	2, 3	CP 18/2 SafetyNET p RTFN	22	1, 3, 4, 5, 6
		1	CP 19/1 MECHATROLINK-II	24	1, 3, 4, 5, 6
19	MECHATROLINK	1	CP 19/2 MECHATROLINK-III	24	1, 3, 4, 5, 6

Прикладной уровень	TELNET, FTP, NNTP, OPC	Общая память сети	
Транспортный уровень	UDP, TCP	Нет	
Сетевой уровень	IP		
Канальный уровень	ISO/IEC 8802-3 Специальное расширение для управления расписанием приема/передачи		
Физический уровень	ISO/IEC 8802-3 (Резервированный)		

Рис. 3 Коммуникационный профиль сети TCnet

в реальном времени на базе ISO/IEC 8802-3». Семейству коммуникационных профилей TCnet в стандарте назначен номер 11 (CPF 11). Дополнительная информация о протоколе TCnet приведена в соответствующих частях стандарта IEC 61158 «Сети для передачи производственных данных. Спецификации полевых шин». Протокол TCnet отвечает требованиям промышленной автоматизации, обеспечивает предсказуемую и надежную передачу данных, поддерживает обмен данными между различными техническими средствами автоматизации (в том числе и с полевыми устройствами) в приложениях, требующих передачи данных в режиме реального времени. Протокол поддерживает синхронизацию времени между контроллерами, приводами, датчиками и другими полевыми устройствами.

Коммуникационный профиль протокола реального времени TCnet показан на рис. 3.

Канальный уровень для сети реального времени TCnet имеет расширение по сравнению со стандартным, но при этом остается полностью совместимым со стандартным MAC-протоколом стандарта ISO/IEC 8802-3. Это позволяет обслуживать трафик реального времени протокола TCnet наряду с обычным трафиком протокола Ethernet. На прикладном уровне протокола TCnet используется специальная система общей разделяемой памяти сети. Общая память сети — это память, используемая глобально всеми коммуникационными узлами сети, а также приложениями для взаимодействия с ними. Для приложений, использующих стандартный протокол Ethernet ISO/IEC 8802-3, уровни

выше канального уровня (Data Link Level) представлены в обычном неизменном виде. Это означает, что приложения, критичные к времени обмена, использующие на прикладном уровне общую разделяемую память протокола TCnet, работают параллельно с обычными приложениями. На транспортном уровне протокола реализованы дополнительные специ-

альные механизмы, указанные в IEC 61158-3-11, обеспечивающие распределение и целостность данных во времени и пространстве.

### Механизм управления доступом к среде в протоколе TCnet

В протоколе TCnet реализован так называемый детерминированный упорядоченный множественный доступ (DOMA, Deterministic Ordered Multiple Access) к среде передачи. Данный метод доступа осуществляет детерминированное управление доступом к среде, чтобы избежать коллизий, возникающих, когда несколько узлов одновременно отправляют кадры данных и предоставляют возможность отправлять данные каждому узлу в последовательном порядке и в течение заданного периода времени. На рис. 4 показан основной принцип управления доступом к среде, реализованный в TCnet (IEC 61158-4-11 Industrial communication networks — Fieldbus specifications — Part 4-11: Data-link layer protocol specification — Type 11 elements).

Во время начала каждого периода цикла высокоскоростной передачи данных по сети (Tsyn) кадр SYN передается на все узлы. При получении кадра SYN узел с последовательным номером 1 начинает отправлять свои кадры данных, а после этого передает свой CMP-кадр, чтобы сообщить о завершении передачи своих кадров данных. Узел с номером N может отправлять свои кадры данных только после приема кадра CMP с предыдущего (N-1) узла сети. После того, как все узлы отправят свои кадры данных, начнется период поиска новых

узлов. Кадр REQ посылается новым узлом, запрашивающим подключение к сети TCnet. Следующий свободный номер присваивается новому узлу в момент предоставления разрешения на присоединение к сети. Время подключения нового узла к сети ограничено Tm.

Каждый узел может удерживать право передачи данных на за-

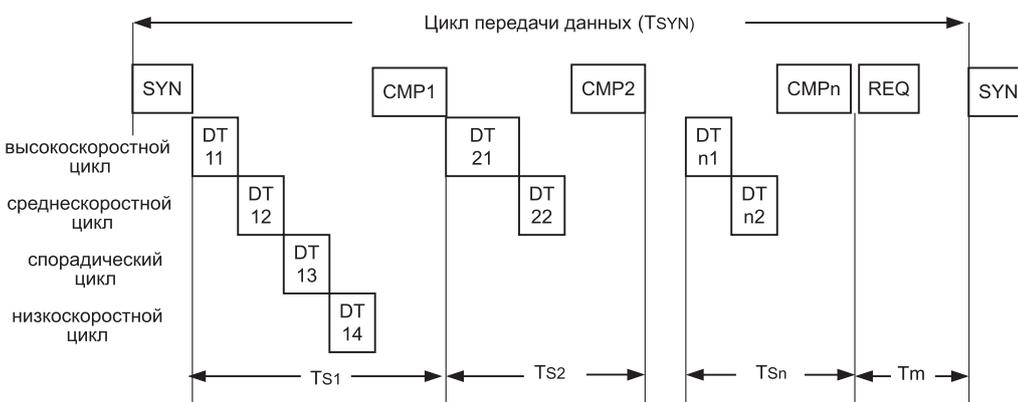


Рис. 4. Иллюстрация метода доступа к среде DOMA, реализованного в протоколе TCnet

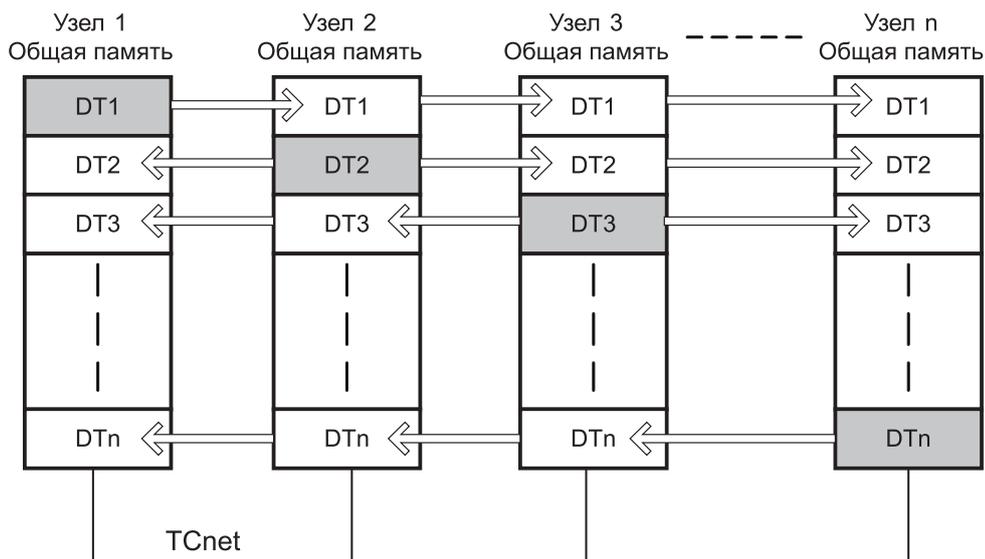


Рис. 5. Концепция общей памяти сети TCnet

данное время ( $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ , ... $T_{sn}$ ) и должен отправить свой кадр SMP (окончание передачи) следующему узлу, готовому принять права передачи, в течение строго установленного промежутка времени. Данные, подлежащие обязательной отправке, и данные, отправка которых может быть перенесена на следующий цикл, определяются приоритетом данных.

Как видно из рис. 4, цикл передачи данных включает как критические циклические данные сети TCnet, так и спорадическую передачу сообщений обычного Ethernet. Данные реального времени передаются циклически по сети и разделены на несколько приоритетов. Каждому приоритету соответствует свой цикл передачи данных. Протокол TCnet определяет три цикла передачи данных: высокоскоростной, среднескоростной

Таблица 2. Основные технические характеристики сети TCnet

Параметр	Описание	
Скорость передачи данных	100 Мбит/с	
Доступа к среде передачи	DOMA (детерминированный упорядоченный множественный доступ)	
Топология	Двойное кольцо, звезда	
Расстояние	Максимальная длина между узлами: Одномодовое оптоволокно: 8км Многомодовое оптоволокно: 2км Витая пара: 100 м	
Число узлов	До 254 узлов	
Режимы передачи	Циклический Высокоскоростной цикл: от 1 до 160 мс Среднескоростной цикл: от 10 до 1000 мс Низкоскоростной цикл: от 100 до 10000 мс Передача сообщений TCP/IP	
Число циклических данных	128KW (слово 16 bit) 2048 блоков передачи (один блок до 64 слов) Объем данных на узел: Высокоскоростной цикл: 64 блока Среднескоростной цикл: 128 блоков Низкоскоростной цикл: 384 блока	
Синхронизация времени	С точностью до 10мкс	
Кабель	Медь	Витая пара категория 5е
	Оптика	Оптический кабель (62,5/125 или 50/125)
Разъем	Медь	RJ-45
	Оптика	MT-RJ

и низкоскоростной. Каждый узел отправляет высокоскоростные циклические кадры данных каждый раз, когда он получает право передачи. Данные более низких приоритетов, то есть циклические данные среднескоростного цикла, спорадические данные Ethernet и данные низкоскоростного цикла отправляются или не отправляются в зависимости от оставшегося времени после передачи высокоскоростных циклических данных.

Время удержания права передачи каждого узла определяется следующими настройками: время высокоскоростного, среднескоростного, низкоскоростного циклов, время цикла передачи спорадических Ethernet-сообщений, объем данных передачи для каждого узла.

После отправки всех высокоскоростных циклических данных узел отправляет циклические данные среднескоростного цикла. Если время удержания права передачи заканчивается при отправке среднескоростных циклических данных, передача среднескоростных циклических данных прерывается, и отправляется кадр SMP. Когда N-й узел снова получает право на передачу, то сначала отправляются все высокоскоростные циклические данные, а затем оставшиеся с предыдущего раза данные среднескоростного и других более медленных циклов.

После отправки всех высокоскоростных циклических данных узел отправляет циклические данные среднескоростного цикла. Если время удержания права передачи заканчивается при отправке среднескоростных циклических данных, передача среднескоростных циклических данных прерывается, и отправляется кадр SMP. Когда N-й узел снова получает право на передачу, то сначала отправляются все высокоскоростные циклические данные, а затем оставшиеся с предыдущего раза данные среднескоростного и других более медленных циклов.

### Концепция общей памяти сети TCnet

На рис. 5 показана концепция циклической передачи данных с использованием общей разделяемой памяти сети TCnet (IEC 61158-5-11 Industrial communication networks — Fieldbus specifications — Part 5-11: Application layer service definition — Type 11 elements). При обмене данными используется механизм циклического широковещательного обращения к общей памяти сети, которая физически реализована в каждом узле сети и содержит копию общего адресного пространства. Общая память разделена на отдельные области для данных каждого узла. Обновление области данных конкретного узла в памяти всех узлов происходит в течение фиксированного циклического периода. Таким образом, контроллеры и другие устройства сети TCnet могут быстро получить доступ к данным друг друга.

### Основные технические характеристики TCnet

Сеть TCnet может быть построена по топологии звезда (с возможностью резервирования каналов связи) или двойного кольца. Высокая отказоустойчивость сети TCnet в случае двойной кольцевой топологии дополнительно обеспечивается за счет того, что движение пакетов данных в каждом кольце возможно в обоих направлениях, что позволяет сети сохранять работоспособность при наличии двух обрывов в каналах связи.

Основные технические характеристики сети TCnet приведены в таблице.

Сеть TCnet используется не только для связи между контроллерами, станциями оператора, приводами, датчиками и другими интеллектуальными полевыми устройствами. В новейшем поколении контроллеров серии nv фирмы Toshiba специально выделенное двойное резервированное кольцо сети TCnet используется для опроса модулей ввода/вывода. Для отражения специфики и назначения данной сети она носит название сеть TCnet I/O. Максимальное число узлов в сети TCnet I/O уменьшено до 32 ед., число модулей ввода/вывода, подключаемое к каждому узлу равно 16 ед. Такое решение обладает высокой надежностью и отказоустойчивостью, необходимой для непрерывных процессов, а также высокой скоростью необходимой для быстрых процессов таких, как управление перемещением или движением. Для сети TCnet время высокоскоростного скана может составлять всего 100 мкс, время среднескоростного скана — 1 мс. Такая скорость позволила отказаться от разработки модулей параллельного ввода/вывода для nv серии контроллеров Toshiba. Если необходимо подключе-

ние параллельного ввода/вывода предыдущих серий контроллеров, требуется использовать специальные коммуникационные модули.

### Заключение

Особенности протокола TCnet позволяют строить сети реального времени, обладающие повышенной отказоустойчивостью и возможностью «горячей» замены кабелей и оборудования сети. Протокол по умолчанию предполагает использование резервированной среды передачи данных, что полностью исключает задержку переключения между основным и резервным коммуникационным каналом. Система трехуровневого приоритета передачи циклических данных позволяет применять сети TCnet не только в автоматизации непрерывных процессов, но и в системах управления перемещением и движением, в решениях, требующих гарантированной и быстрой реакции системы управления. Система ввода/вывода новейшего поколения контроллеров nv фирмы Toshiba использует протокол TCnet и топологию двойного резервированного кольца. Это позволило использовать модули ввода/вывода TCnet I/O как для автоматизации быстрых, так и непрерывных процессов, тем самым стирая грань между последовательным и параллельным выводом/выводом.

### Список литературы

1. Лопухов И. Сети Real-Time Ethernet: от теории к практической реализации // Современные технологии автоматизации, 2010, №3, с. 8-15.
2. Аристова Н.И. Ethernet в промышленной автоматизации: преодоление преград // Автоматизация в промышленности. 2013 №1.

*Скворцов Михаил Сергеевич — канд. техн. наук, ведущий инженер-программист АО «СПИК СЗМА»*

*Контактный телефон: (812) 610-78-79.*

*E-mail: mikhail\_skvortsov@szma.com*

### «Модульные Системы Торнадо» автоматизируют Кемеровскую ГРЭС

Специалисты компании «Модульные Системы Торнадо» завершают монтаж и наладку автоматизированной системы технологического контроля (АСТК) параметров основного и вспомогательного технологического оборудования на Кемеровской ГРЭС. В объеме внедрения 2017 г. — 1242 канала ввода/вывода, первая стадия внедрения АСТК охватывает котлоагрегат № 13 и АСТЭП (автоматизированная система расчета технико-экономических показателей) станции.

В ходе работы осуществлена автоматизация сбора и первичной обработки информации с заменой устаревших датчиков и приборов КИП на современное оборудование и установкой АРМ на рабочие места машинистов, обеспечена автоматическая передача текущей и архивной технологической информации на уровень АСУ производства, технические специалисты и руководители Кемеровской ГРЭС и ООО «Сибирская генерирующая компания» теперь обеспечены достоверной оперативной и ретроспективной информацией.

Центральной частью АСТК является программно-технический комплекс (ПТК) «Торнадо-N», разработанный компанией «Модульные Системы Торнадо» и включающий программируемые средства автоматизации и другие средства вычислительной техники. Кроме ПТК в состав системы входит оборудование полевого уровня: датчики, вторичные приборы, счетчики электрической энергии.

Инновационное архитектурное решение ПТК «Торнадо-N» позволяет к функционирующей системе добавлять дополнительные модули, причем эта процедура не требует модификации действующей части системы. Комплекс соответствует требованиям технических регламентов Таможенного

Союза и способен работать 15–20 лет в «жестких» промышленных условиях, что очень важно для критически важных объектов. В его состав включены безвентиляторные промышленные компьютеры IPC Gridex и модули ввода/вывода MIRage (также разрабатываемые и производимые компанией «Модульные Системы Торнадо»).

В качестве ПО сервера приложений используется AISTSrv (также разработка МСТ). АРМ инженера АСТК оснащен необходимыми специализированными программными инженерными пакетами, позволяющими решать задачи обслуживания и модификации системы:

- программами дистанционной загрузки прикладного ПО в технологические контроллеры;
- средствами диагностики и выявления неисправностей;
- средствами резервного копирования и восстановления контроллеров;
- редактором настроечных параметров в контроллерах;
- конфигуратором ПТК.

Внедрение новой системы повышает устойчивость Кемеровской ГРЭС к сбоям и авариям за счет отслеживания всех параметров оборудования в режиме реального времени, повышения оперативности и качества управления производством. Собранная и обработанная АСТК технологическая информация передается в комплекс АСТЭП — программный информационно-расчетный комплекс поддержки производственных процессов теплоэлектростанций. После полной реализации проекта система будет охватывать все станции группы компаний энергохолдинга, что создаст условия для глобальной оптимизации выполнения графика тепловой и электрической нагрузки с наибольшей экономической эффективностью.

[Http://tornado.nsk.ru](http://tornado.nsk.ru)