# Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоиммунных транспортных систем

**Д. В. Ефанов,**
*д-р техн. наук, доцент, первый зам. генерального директора — главный инженер ООО «ВЕГА Групп», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ))*

**Г. В. Осадчий,**
*технический директор ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)*

**Д. Г. Плотников,**
*канд. техн. наук, доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ*

**А. В. Шинкаренко,**
*ведущий инженер-программист ООО «Робо-Тек»*


**В статье представлена архитектура универсальной системы мониторинга, а также дорожная карта разработки универсальной аппаратно-программной платформы для такой системы.**

Жизненный цикл технических объектов, создаваемых человеком, очень схож с жизненным циклом подавляющего большинства живых существ. Вначале возникает мысль о создании некоего объекта, затем эта мысль дополняется действиями по его созданию (проектирование, конструирование и т. д.), далее объект обретает физическую форму, наступает этап приработки (фактически некоторого обучения), а следом за ним — этап нормальной деятельности (эксплуатации). Так же как и у биологических существ, у технических объектов наступает время постепенного старения и утраты основных свойств (деградации), что в конечном итоге всегда приводит к гибели объекта (в техническом смысле это демонтаж и утилизация либо тотальная модернизация). В обществе колоссальное значение имеют достижения медицины и медицинской диагностики, мониторинга состояния организма, что определяет возможности своевременного медицинского вмешательства для восстановления физической формы. Без многих достижений в сфере диагностики и мониторинга организма человек не имел бы шанса избежать утраты физической формы и — в ряде случаев — гибели.

Аналогично медицинской диагностике развивается и область технической диагностики: с появлением развитой компьютерной техники, миниатюрных измерительных средств, универсальных каналов трансляции измеренных параметров в пункты их обработки и т. д. возникают возможности в организации систем технического диагностирования и мониторинга **[1–5]**. К настоящему моменту основной параметр диагностирования — «время», а точнее, возможность предсказания наступления события. Это имеет закономерный экономический эффект: чем раньше выявлен дефект и поставлен диагноз, тем дешевле лечение. Очень часто такие системы внедряют под лозунгами автоматизации процедур по техническому обслуживанию, однако истинная цель их внедрения — создание возможности прогнозирования событий для их предотвращения. Получение подобного свойства техническим объектом приводит к тому, что этот объект совершенствует собственный технический иммунитет и становится менее уязвимым к внешним дестабилизирующим факторам.

Техническая диагностика и ее развитие в виде мониторинга базируются на уточнении априорной информации о надежности объекта диагностирования с использованием дополнительной информации о его истории (аналог «истории болезни» в медицинской диагностике), от датчиков, обследований, наблюдений и т. д. Система технического диагностирования и мониторинга — не только набор датчиков, преобразователей, каналов передачи диагностической информации, средств их хранения и обработки. Система мониторинга включает в себя еще и некий «скелет», полученный от создателя: архитектуру, алгоритмы функционирования, первичную информацию об объектах диагностирования и мониторинга, способы донесения обработанной информации до конечного пользователя. В идеальном варианте система технического диагностирования и мониторинга должна быть звеном в цепи обратной связи системы управления и в автоматическом режиме должна

Рис. 1. Ключевые технологии и компоненты транспортных систем будущего

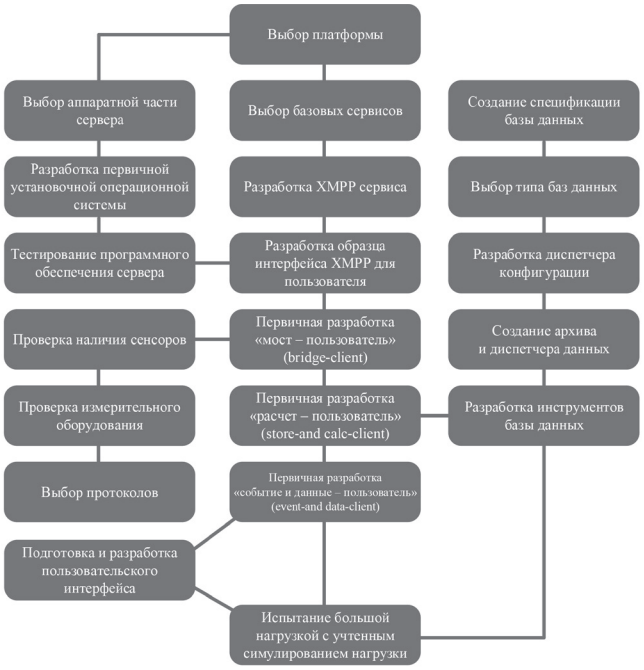


Рис. 2. Дорожная карта реализации системы мониторинга

не только сообщать о потенциальном критическом событии, но и управлять этой информацией так, чтобы подобное событие можно было предотвратить, а в худшем случае — парировать наиболее эффективным способом с минимальными экономическими и экологическими потерями. Система мониторинга — необходимый компонент для создания технических систем во всех сферах: в строительстве, промышленности, на транспорте. Наличие систем мониторинга — обязательный атрибут реализации технических объектов, для которых возможно «управление энергией» и поддержание оптимальных характеристик таких составляющих, как энергоэффективность, использование возобновляемых источников энергии, минимизация углеродного следа при требуемом и повышаемом техническом иммунитете (*рис. 1*). Поэтому системы мониторинга становятся базовыми средствами для оптимального «управления энергией».

Не секрет, что существует большое разнообразие систем мониторинга, которые используются как в бытовой сфере, так и в сфере промышленности и транспорта. Все эти системы, по сути, имеют одинаковую «основу», но реализованы по-разному. Однако общие особенности систем мониторинга оказываются неизменными. В данной статье авторами предлагается универсальная архитектура систем мониторинга, охватывающая и обобщающая известные технические решения. Ее использование позволяет реализовать более совершенную систему мониторинга, чем известные к настоящему моменту.

## Архитектура универсальной системы мониторинга

Система технического диагностирования и мониторинга представляет собой совокупность объекта диагностирования и мониторинга (далее — объект мониторинга) и технических средств его диагностирования и мониторинга **[6; 7]**. Перед реализацией системы мониторинга производится моделирование объекта мониторинга с целью определения множества диагностических параметров и контрольных измерительных точек, необходимых для качественного мониторинга и выявления требуемого множества диагностических событий. Именно в этом появляется отличие всех систем мониторинга — требуется знать «природу» объекта, особенности его обустройства и исторические данные о процессах эксплуатации (если речь идет об оснащении системой мониторинга уже эксплуатируемого объекта). Архитектура же систем мониторинга может быть универсальной.

Следует обратить внимание на то, что в ряде случаев при действующих ограничениях на реализацию систем мониторинга (отсутствие необходимых каналов передачи данных с требуемой скоростью, запрет на использование внешних сетей вне предприятия, невозможность использования постоянных источников энергоснабжения и пр.) становится невозможным получение полного множества диагностических параметров, необходимого для высокой полноты и глубины диагностирования и для получения достоверного прогноза и оценки остаточного ресурса. При этом всю обработку данных оказывается возможным вести только на промежуточных концентраторах, располагаемых в непосредственной близости к объекту мониторинга. Например, в железнодорожной отрасли весьма ограничено использование каналов связи: на большинстве объектов присутствует только медножильный кабель, для применения — в качестве тракта передачи данных — оптоволоконных кабелей требуется большое число согласований, при этом трансляция данных в сетевые центры мониторинга возможна лишь по сети передачи отраслевого назначения, а использование радиоканалов и внешнего интернета практически исключено. Эти обстоятельства являются сдерживающими факторами при внедрении высокоразвитых систем мониторинга на объектах транспортной инфраструктуры.

Система мониторинга реализуется по дорожной карте, представленной на *рис. 2*.

На *рис. 3* приведена универсальная архитектура системы мониторинга, сформированная авторами по результатам

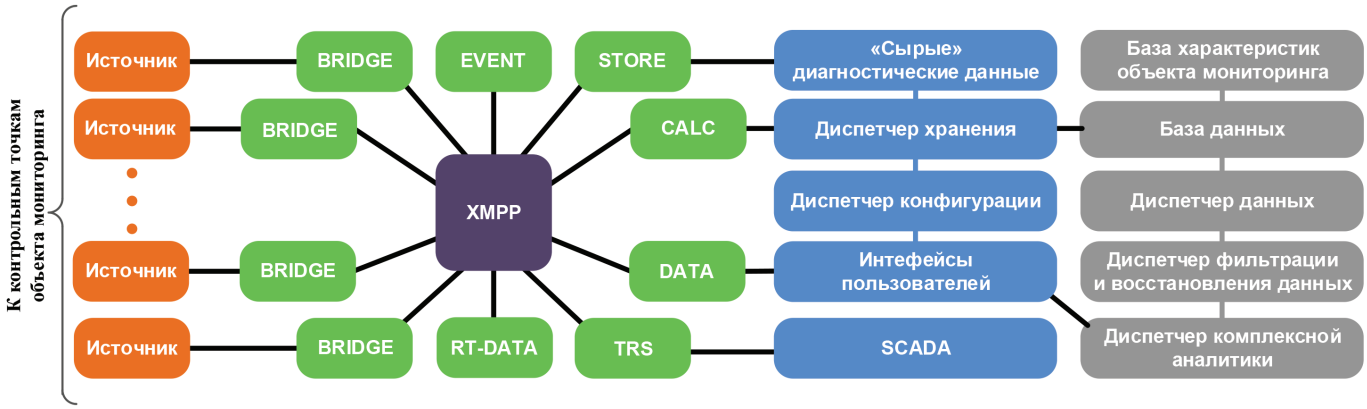


**Рис. 3. Архитектура системы мониторинга**

многолетней разработки и эксплуатации систем мониторинга на различных объектах строительной отрасли, промышленности и транспорта.

В универсальной архитектуре системы мониторинга показаны и аппаратные, и программные ее компоненты, позволяющие получить первичные («сырые») диагностические данные, передать их в базу данных, осуществить фильтрацию и восстановление данных **[8; 9]**, а также комплексную обработку, чтобы получить диагноз, прогноз и оценку остаточного ресурса объекта мониторинга и выдать эту информацию конечным пользователям. Источник данных, как правило, представляет собой совокупность датчика физической величины (сенсора) и преобразователя. Они управляются с помощью накопителя данных и конвертера протокола (Bridge). Здесь происходит сбор данных от источника (например, аппаратная часть или программный интерфейс приложения третьей стороны) и отправка их в XMPP-измерительный канал. Накопление «сырых данных» из каналов измерений и хранение этой матрицы в банке «сырых данных» осуществляются с помощью модуля STORE. Сам банк «сырых данных» может быть представлен в виде текстового файла или любого аналогичного варианта. Сбор данных из канала измерений и их конвертацию в физические величины согласно заложенной информации в диспетчере конфигурации с отправкой данных в измерительный канал осуществляют в модуле CALC. Модуль DATA представляет собой программный интерфейс приложения для предоставления данных в интерфейс пользователя (включая вывод данных во внешние системы). Здесь обеспечен доступ к данным/событиям/статусам каналов. Интерфейс RT-DATA представляет собой программный интерфейс приложения и предназначен для просмотра в реальном отрезке времени, например для анализа ситуации. Интерфейс TRS также является программным интерфейсом приложения и обеспечивает транспортировку слоя для систем управления, подобных SCADA (или близких вариантов этой системы). Модуль EVENT производит данные для канала данных, где используется информация из канала данных и диспетчера конфигурации. Диспетчер хранения записывает диагностическую информацию в базу данных. Данные берутся из банка «сырых данных», конвертируются с использованием информации от диспетчера

**Табл. 1. Типовые компоненты систем мониторинга**

| Компонент | Решаемые задачи в составе системы мониторинга |
|---|---|
| Датчики (сенсоры) | Прямое или косвенное измерение требуемых параметров с помощью оптимального набора сенсоров (с учетом среды функционирования, характеристик устройства, экономического и экологического факторов) |
| Преобразователи | Наиболее ранняя оцифровка измеренных значений с датчика для передачи сигнала в виде определенного цифрового кода с возможностью предварительной обработки (усреднения), распознавания ошибок в линии связи, обеспечения помехозащищенности, восстановления значений |
| Сеть | Передача оцифрованного сигнала на верхний уровень сбора, хранения, обработки и выдачи конечному пользователю по оптимальным в заданных условиях каналам связи |
| Устройства сбора и обработки данных (УСОД) | Сбор и обработка данных со всех узлов в хранилище верхнего уровня (обычно между устройствами оцифровки сигнала и конечными серверами существуют промежуточные устройства сбора данных (несколько последовательных верхних уровней), а сами серверы четко выражены и являются вершиной структуры системы, но возможны и технические решения, когда средние уровни отсутствуют) |
| Программные средства | Программа или набор взаимосвязанных программных модулей, обеспечивающих обработку, накопление информации, собираемой с датчиков, и передачу их в интерфейс, а также выполнение сопутствующих сервисно-административных задач (архивирование, резервирование, разграничение прав доступа). Совокупности этих программ зачастую распределены по нескольким устройствам (УСОД нижнего и верхнего уровней, автоматизированные рабочие места операторов) |
| Интерфейсы | Выдача обработанной информации:<br>— операторам: в виде значений/таблиц/графиков/интегральных сигналов;<br>— системам верхних и смежных уровней в запрашиваемом формате;<br>— исполнительным механизмам в автоматическом или автоматизированном режиме в виде управляющих воздействий |

конфигурации и записываются в базу данных (либо в несколько баз данных). Диспетчер данных обеспечивает программный интерфейс приложения прочтением информации из базы данных (в аналогичных вариантах может обеспечить средствами записи информации непосредственно в базу данных). Далее с помощью диспетчера фильтрации и восстановления осуществляется фильтрация «сырых данных» с поиском аномалий и восстановлением пропущенных данных. Диспетчер комплексной аналитики осуществляет обработку диагностической информации средствами интеллектуального анализа данных (data mining) и машинного обучения **[10–14]**. Диспетчер конфигурации обеспечивает всецело функциональность конфигурации системы и снабжает информацией всех пользователей.

При проектировании универсальной аппаратно-программной платформы необходимо определить специфические задачи и требования в различных сферах, для которых важно наличие средств мониторинга, выявить ключевые особенности существующих систем мониторинга, структурировать текущие задачи и имеющиеся на данный момент возможности для стандартизации. Это позволяет выработать рекомендации по унификации компонентов, повысить уровень абстракции элементов, входящих в систему мониторинга, разделить систему на интеллектуальные микросервисы. В свою очередь, достижение подобных целей позволяет расширить возможности и сферы применения универсальной аппаратно-программной платформы, упростить ее состав за счет способности выполнять дополнительные задачи перекомпоновкой имеющихся частей без разработки новых, стандартизировать и унифицировать подход к решению широкого класса проблем мониторинга.

В настоящее время сформировались типовые компоненты систем мониторинга, закладывающиеся во все подобные системы (*табл. 1*).

Чем более масштабна система мониторинга, тем полнее в ней проявляются перечисленные в таблице компоненты: большой объем разнообразных датчиков (сенсоров), множество систем оцифровки и сбора данных, протяженные сети передачи, многоуровневое накопление и обработка измерений, наличие корневых серверов.

В системах малого размера (полуавтономные системы, мониторинг малого числа параметров, локальные системы) отдельные составляющие могут объединяться в пределах одного устройства. Например, автономная система измерения температуры: сигнал с датчика поступает сразу на аналогово-цифровой преобразователь программируемого логического контроллера, который одновременно является устройством сбора и обработки информации. Однако и в этом случае при ближайшем рассмотрении присутствуют все обозначенные выше компоненты; аналогово-цифровой преобразователь соединен с микроконтроллером внутренней цифровой шиной ($I^2C$, ISP), разделение на уровни выполнено в пределах единого программного обеспечения устройства: программная функция обработки измерения играет роль «устройства сбора данных», а функция сохранения результата в постоянном запоминающем устройстве — роль «корневого хранилища».

Если рассматриваются системы мониторинга значимых объектов, то помимо центральных серверов данные о мониторинге могут передаваться в центры мониторинга регионального масштаба: как от городского уровня, так и вплоть до систем государственного уровня или мирового масштаба.

Существуют автономные/полуавтономные системы мониторинга, накапливающие информацию во внутренней памяти устройств. Зачастую они не имеют постоянной устойчивой связи с центральным хранилищем (из-за среды, неблагоприятной для распространения сигнала, или удаленности от корневого поста, а равно и для минимизации энергопотребления), однако периодически выполняется считывание накопленных значений (оператором при подключении к блоку или после транспортировки блока на центральный пост и подключения на месте). Здесь также наблюдается разделение на уровни с наличием корневого центра, а канал связи характеризуется большой дискретностью снятия информации и необходимостью перемещения устройств. Оптические системы измерений протяженностью 100 [м]...[км], несмотря на значительные покрываемые расстояния, не противоречат пункту о «ранней оцифровке», поскольку рассматриваются как единый датчик, на входе которого уже непосредственно размещен цифровой блок.

*В табл. 2* сведены основные данные о ряде известных в России и за ее пределами систем мониторинга сложных технических сооружений, а также характеристики перспективной системы мониторинга. Следует отметить, что сама система мониторинга должна поставляться и обслуживаться ее разработчиком (контракт «жизненного цикла»), а заказчик системы должен получать только эффект в виде прогноза и остаточного ресурса, пользуясь этими данными по своему усмотрению. Фактически должен реализовываться сервис информатизации эксплуатирующего технический объект персонала с предоставлением ему результатов мониторинга с высокой их достоверностью. Это может привести даже к разделению ответственности между эксплуатирующим персоналом и поставщиком системы мониторинга при возникновении нарушений, аварий, вынужденных простоев и пр. Подобная особенность системы мониторинга, однако, требует от разработчика большего внимания к технологиям сбора данных и к работе самогó диагностического оборудования, а также подталкивает его к переходу на создание компонентов систем мониторинга с контролепригодными и самопроверяемыми структурами **[15]**.

Базовая платформа системы мониторинга должна обеспечивать:

- расширенное интеллектуальное самодиагностирование системы;
- оценку достоверности результатов мониторинга;
- выдачу информационных сообщений;
- архивирование событий;
- использование сертифицированного оборудования на каждом уровне реализации.

При этом функционал должен охватывать следующие компоненты действительно качественного мониторинга:

- формирование «цифрового двойника» объекта диагностирования;
- моделирование полного жизненного цикла системы;
- комплексную аналитику диагностических данных с применением методов интеллектуального анализа и машинного обучения;

**Табл. 2. Известные системы мониторинга и будущая система мониторинга**

| Характеристики системы | HBM | «Авангард» | MasterSCADA4D | Prometheus | SAVCOR | Wonderware | Будущая система |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Страна** | **Германия** | **РФ** | **РФ** | **США/международная** | **Финляндия** | **США** | **Не имеет значения** |
| **Лицензия программного обеспечения** | Проприетарная, платная | Проприетарная, платная | Проприетарная, платная | Свободное открытое программное обеспечение | Проприетарная, платная | Проприетарная, платная | Проприетарная, платная |
| **Универсальность** | +/– | – | + | + | – | + | + |
| **Закрытость** | Да + API | Да | Да + API/протоколы | Открытое программное обеспечение + API/протоколы | Да | Да + протоколы | Да + API/протоколы |
| **Интерфейс и программное обеспечение** | | | | | | | |
| **Интерфейс пользователя** | Нативная web-панель | Нативный | Нативный web-интерфейс HMI-панели | Web-интерфейс | Web-интерфейс | Нативный web-интерфейс HMI-панели | Web-интерфейс, мобильные приложения |
| **Операционная система интерфейса** | Windows Android (web) Кросс-платформенная (web) | Windows | Windows Linux, QNX, Android *Кросс-платформенная (web) | Кросс-платформенная (web) | Кросс-платформенная (web) | Кросс-платформенная (web) | Кросс-платформенная (web) |
| **Операционная система платформы** | Windows | Windows | Windows Linux | Windows Linux FreeBSD | Linux | Windows | *Windows Linux |
| **Внешний API** | + (ActiveX) | – | + (C#) | + | – | – | + (JS, JSON) |
| **Дополнительные протоколы** | – | – | + OPC UA Modbus RTU/TCP JSON | + JSON | – | + OPC UA Modbus RTU/TCP | + OPC UA Modbus RTU/TCP JSON |
| **Встроенный язык программирования** | + (CatScript) | – | + (МЭК — FBD, ST) | + | – | + (МЭК) | + (JS) |
| **Используемое хранилище** | Собственная кольцевая БД | *MS SQL (стороннее ПО) | MS SQL *Внешние MS SQL и PostgreSQL | Собственная кольцевая БД (на основе TSDB) | Собственная кольцевая БД + xml-хранилище | «Галактика» на базе MS SQL | + Собственная кольцевая БД + реляционная модель + объектная модель |
| **Устройства сбора и обработки данных** | | | | | | | |
| **Операционная система** | Прошивка | Прошивка | N/A | N/A | Прошивка | N/A | Linux |
| **Программируемые логические контроллеры** | – | – | N/A | N/A | – | N/A | + |

• формирование индекса реального состояния;

• прогнозную аналитику (оценку остаточного ресурса);

• выдачу долгосрочной дорожной карты по объекту;

• выдачу краткосрочных рекомендаций по оптимизации технического обслуживания;

• выдачу рекомендаций по оптимизации и/или резервированию систем, в том числе с целью использования в составе цепей обратной связи для управления технологическими процессами.

## Рекомендации по проектированию и разработке систем мониторинга

Значительно повысить эффективность технологии мониторинга можно путем следования таким рекомендациям.

1. Проектирование цифрового аппаратно-программного комплекса:

• проектируются исключительно цифровые аппаратно-программные средства — преобразователи, сеть, устройства сбора и обработки данных, серверное программное обеспечение, интерфейсы;

• уровень сенсоров, как устройств, содержащих аналоговые элементы, в достаточном количестве представленных на рынке и не подверженных быстрому устареванию, исключается из процесса разработки (возможна и эффек-

**Табл. 2. (Окончание)**

| Характеристики системы | HBM | «Авангард» | MasterSCADA4D | Prometheus | SAVCOR | Wonderware | Будущая система |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Программируемость** | – | – | N/A | N/A | – | N/A | + |
| **Интерфейсы** | CAN<br>Ethernet<br>USB | ZigBee<br>GSM | N/A | N/A | RS-232<br>RS-485 | N/A | *GSM<br>*CAN<br>Ethernet<br>USB<br>RS-232<br>RS-485 |
| **Автономность** | + | + | N/A | N/A | – | N/A | + |
| **Сеть** | CAN | ZigBee<br>GSM<br>Ethernet | N/A<br>*Ethernet | N/A<br>*Ethernet | *RS-232 -><br>Eth<br>SLS (RS-485) | N/A<br>*Ethernet | Ethernet |
| **Преобразователи** | | | | | | | |
| **Число каналов** | 4 | 1 | N/A | N/A | 1/2/3/SER | N/A | 3 +<br>RS-232/485 |
| **Питание [В]** | 12...24 | *Автономное от батареек | N/A | N/A | 7...20 | N/A | 7...48 |
| **Обработка данных** | | | | | | | |
| **Способ обработки диагностических данных** | Пороговая обработка единичных параметров | Пороговая обработка единичных параметров | Пороговая обработка единичных параметров | Пороговая обработка единичных параметров | Пороговая обработка единичных параметров | Пороговая обработка единичных параметров | Фильтрация, восстановление, интеллектуальная комплексная обработка |

тивна разработка только уникальных диагностических приборов **[16]**).

2. Обеспечение универсальности и расширяемости проектируемых компонентов:

• необходима поддержка работы со сторонними изделиями для возможности интегрирования разработок в существующие системы или оптимизации расходов при создании новых систем;

• расширение функциональности системы за счет подключения сторонних решений, разработка которых собственными силами не планируется.

3. Разработка трех основных макроблоков системы (преобразователи, устройства сбора и обработки данных, программное обеспечение) должна производиться совместно, при этом необходимо соблюдение базовых принципов:

• постоянное координирование действий при создании основных компонентов системы;

• определение при распределении ресурсов приоритета программного обеспечения как наиболее универсального элемента комплекса, обеспечивающего раннее использование поверх/вместо других уже созданных систем.

4. Использование Ethernet в качестве промышленной сети:

• широкое распространение технологии и оборудования;

• недорогие промышленные микросхемы;

• широкий ассортимент повторителей;

• наличие активных коммутаторов и разветвителей для построения шин типа «звезда»;

• наличие преобразователей во все виды интерфейсов (RS232/422/485-Ethernet, USB-Ethernet, «Оптоволокно-Ethernet» и др.);

• высокая помехоустойчивость и скорость передачи данных;

• возможность передавать произвольный поток данных.

При разработке измерительного оборудования необходимо следовать принципам экологичности. Экологичность и минимизация углеродного следа являются приоритетами наиболее развитых стран, таких, например, как государства Европейского союза, Великобритания, Норвегия, Швейцария. Поэтому при разработке компонентов систем мониторинга нужно выбирать экологичные материалы, а режимы функционирования объектов настраивать с учетом назначаемого класса энергоэффективности устройства **[17]**. Кроме того, необходимо учитывать возможность использования средств мониторинга для «управления энергией» в соответствии с климатической обстановкой и рациональным расходом энергии с целью решения той или иной задачи.

Следует еще раз подчеркнуть, что организация систем мониторинга позволяет не только наделять сложные объекты техническим иммунитетом, но и управлять наиболее рационально, с учетом минимизации энергозатрат и ущерба экологической обстановке, технологическими процессами. И здесь можно привести примеры из транспортной области. Наличие системы мониторинга железнодорожной контактной

подвески **[18; 19]** позволяет определять условия, при которых наблюдается гололедообразование, и управлять процессами профпрогрева, а не выполнять его непрерывно в определенные периоды; наличие систем мониторинга локомотивов **[20; 21]** позволяет сокращать время пребывания их в сервисных локомотивных депо, поскольку ускоряются поиск и устранение дефекта, и т. д.

Необходимо обратить внимание на проблему формирования систем мониторинга во всех областях, в том числе в транспортной отрасли. Для каждой из составляющих транспорта должны быть созданы новые и пересмотрены действующие нормативные документы: от концепций мониторинга до документов, регламентирующих состав технических средств и особенности реализации инструментов мониторинга, а также процессы их разработки, конструирования и проектирования. Кроме того, для каждой отрасли должен быть сформирован свод правил, позволяющий легко и эффективно интегрировать системы мониторинга в существующую инфраструктуру с действующими ограничениями и принципами обеспечения безопасности ответственных технологических процессов.

Более тонкое понимание проблемы мониторинга позволит получить не средства хранения больших объемов данных с простейшей классификацией событий (как это реализуется сегодня практически во всех транспортных направлениях и ошибочно называется системой мониторинга, а не системой сбора и хранения данных), но действующий инструмент для наделения объектов техническим иммунитетом и создания высокоиммунных технических систем управления ответственными технологическими процессами. Т

**Литература**


1. Park Y., Kwon S. Y., Kim J. M. Reliability Analysis of Arcing Measurement System Between Pantograph and Contact Wire // The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. — 2012. — Vol. 61. — No. 8. — P. 1216–1220.
2. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. — Санкт-Петербург : ПГУПС, 2016.
3. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example) // Procedia Engineering. 2017. — Vol. 189. — P. 145–151.
4. Белый, А. А. Автоматизация процесса управления техническим состоянием искусственных сооружений Санкт-Петербурга за счет применения средств инструментального мониторинга / А. А. Белый, А. А. Белов, Г. В. Осандчий [и др.] // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 3. — С. 380–406.
5. Belyi A., Shestovitskii D., Myachin V., Sedykh D. Development of Automation Systems at Transport Objects of MegaCity // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, 2019. — P. 201–206.
6. Пархоменко, П. П. Основные положения и рекомендации по организации диагностического обеспечения сложного объекта / П. П. Пархоменко, В. В. Карибский, Е. С. Согомонян — Москва : Ин-т проблем управления, 1985. Препринт.
7. Микони, С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем. — Санкт-Петербург : СПИИРАН, 1992.
8. Ефанов, Д. В. Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры / Д. В. Ефанов, В. Н. Мячин, Г. В. Осадчий, М. В. Зуева // Транспорт РФ. — 2020. — № 2 (87). — С. 35–40.
9. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. Evaluation of Loads Applied on Engineering Structures Based on Structural Health Monitoring // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2020. — Vol. 14. — No. 2. — P. 146–150.
10. Jin W., Shi Z., Siegel D., Dersin P., Douziech C., Pugnaloni M., La Cascia P., Lee J. Development and Evaluation of Health Monitoring Techniques for Railway Point Machines // IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), 2015, Austin, TX, USA.
11. Böhm T. Remaining Useful Life Prediction for Railway Switch Engines Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines // International Journal of Prognostics and Health Management. — 2017. — Vol. 8.
12. Asada T. Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines // University of Birmingham, 2013.
13. Cremona C., Santos J. P. Structural Health Monitoring as a Big-Data Problem // Structural Engineering International. — 2018. — Vol. 28. — Is. 3. — P. 243–254.
14. Luckey D., Fritz H., Legatiuk D., Dragos K., Smarsly K. Artificial Intelligence Techniques for Smart City Applications // Proceedings of the International ICCCBE and CIB W78 Joint Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2020, São Paulo, Brazil. P. 1–14.
15. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников — Москва : Маршрут, 2004.
16. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D., Pristensky D., Barch D. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, 2016. — P. 201–208.
17. Efanow D. W., Osadtschiy G. W. Energy Efficiency Categories for Safety Installations // Signal + Draht. 2020. Bd. 112. Heft 4. S. 36–42.
18. Ефанов, Д. В. Системы стационарного мониторинга и цифровая железнодорожная контактная подвеска / Д. В. Ефанов, Д. В. Барч, Г. В. Осадчий // Транспорт РФ. — 2019. — № 4 (83). — С. 41–44.
19. Efanov D. V., Osadchy G. V., Barch D. V., Belyi A. A. Permanent Monitoring Systems of the Contact-Wire of Railroad Catenary: The Main Tasks of Implementation // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, 2019. — P. 484–487.
20. Chen Z., Lv M., Xu X., Yu F., Jin H. Design of Distributed Monitoring and Diagnosis System for Locomotive Diesel Based on GPRS-Internet // 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 25–27 June 2010, Wuhan, China.
21. Грачев, В. В. Прескриптивный контроль энергоэффективности тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации. — Санкт-Петербург : ПГУПС, 2019.