

УДК 622.23.05

**СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

**А. Л. Манаков, А. А. Игумнов, С. А. Коларж**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
ул. Дуси Ковальчук 191, 630049, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты создания универсальной системы мониторинга технического состояния для горных, строительных и дорожных транспортных и технологических машин, внедрение которой позволит снизить издержки, возникающие в результате внезапного отказа, а также увеличить производительность и эффективность использования машин.

*Техническая диагностика, мониторинг технического состояния, остаточный ресурс, техническое обслуживание, внезапный отказ, диагностические параметры*

---

В настоящее время техническая эксплуатация машинных парков горных и строительных предприятий базируется на использовании плано-предупредительной системы технического обслуживания, где периодичность технических воздействий определена заранее с использованием вероятностных методов и не исключает внезапные отказы узлов и агрегатов машин в промежутке между обслуживаниями.

Уменьшение риска возникновения внезапного отказа и увеличение межремонтного периода связаны с необходимостью постоянного мониторинга технического состояния узлов и агрегатов машины и анализом получаемых результатов. Это можно реализовать только за счет снабжения машины системой мониторинга ее технического состояния (СМТС).

Для повышения эффективности работы горных, строительных и дорожных машин (СДМ) в последние годы ведутся исследования в области создания систем мониторинга, позволяющих передавать информацию о техническом состоянии машины с места ее работы, не прерывая выполнения производственных задач. Применение таких систем позволит сократить время на проведение ТО, увеличить продолжительность работы машин и их производительность, что в итоге приведет к получению дополнительной прибыли.

В настоящее время можно выделить несколько крупных компаний мирового уровня, ведущих разработку систем, позволяющих на удалении проводить оценку технического состояния и производительности машины, не выводя ее из рабочего процесса. Так, компания Komatsu в конце 90-х гг. разработала систему VHMS (Vehicle Health Monitoring System) для большегрузных самосвалов и технически сложных технологических комплексов, работающих в горной промышленности [1]. Система диагностирует техническое состояние узлов и агрегатов с постоянным обменом данных между машиной и оператором сервисной службы. В результате этого сервисный

персонал постоянно получает информацию о техническом состоянии систем машины, может прогнозировать возможные отказы и планировать требуемое сервисное обслуживание. Потребность в такой системе обоснована высокими издержками из-за простоев машин ввиду устранения последствий возникновения внезапного отказа и проведения диагностирования перед ТО, время которого может достигать нескольких часов. В настоящее время компания Komatsu ведет разработку и внедрение систем полной автоматизации технологических процессов при открытой разработке полезных ископаемых. Примером может служить горнопромышленный центр Пилбара в Австралии. Компании Komatsu и Rio Tinto запустили полный цикл беспилотного управления парком большегрузных самосвалов, включающий постановку под загрузку руды, ее транспортировку, выгрузку и возвращение к месту загрузки. При этом скорость транспортировки достигает 50 км/ч, а отклонение от маршрута 1–2 см. Каждый самосвал Komatsu 930E-4AT оснащается лазерными и ультразвуковыми дальнометрами, телекамерами, радарными, GPS навигацией, беспроводной связью. Управление машиной полностью возложено на компьютер, находящийся на удаленном расстоянии, оператор лишь следит за работой самосвала.

Компания Caterpillar продвигает на рынок строительной и дорожной техники систему VIMS (Vital Information Management System), направленную на мониторинг, вычисление производительности и сервисное обслуживание строительной и дорожной техники [2]. Данная система имеет в своем распоряжении набор инструментов, позволяющих рассчитывать производительность, определять эффективность использования, ошибки оператора, отслеживать техническое состояние узлов и агрегатов, а также заранее подготавливать необходимые запасные части к сроку регламентного технического обслуживания и предотвращать аварийные остановки машины.

В России также наметилась тенденция перехода от планово-предупредительной системы технического обслуживания СДМ к системе обслуживания по их техническому состоянию, обязательным условием реализации которой является создание и внедрение в практику ведения работ систем СМТС [3].

В СГУПСе разработана универсальная СМТС, которая в отличие от известных не привязана к машине определенной марки и модели за счет использования встроенных в агрегаты машины датчиков. В случае необходимости система предусматривает установку дополнительных датчиков специального назначения. Она записывает параметры работы узлов и агрегатов машины при разных условиях работы и передает полученную информацию на сервер базы данных. При помощи программного обеспечения, установленного на сервере, можно проводить анализ не только предельных параметров или фиксировать отказы, но и прогнозировать остаточный ресурс машины.

Поскольку универсальная СМТС устанавливается на машины разного целевого назначения, возникает необходимость в определении общих для всех машин диагностируемых параметров узлов и агрегатов, которые позволяют получить объективную информацию о ее состоянии. Работа машины сопровождается различными физическими процессами: тепловыми, шумовыми, вибрационными, изменением давления рабочей среды и т. д. Параметры этих процессов используются в системе как диагностические признаки, содержащие информацию о техническом состоянии объекта без разборки узлов и агрегатов. Например, высокое давление масла в двигателе свидетельствует о необходимости замены засорившегося масляного фильтра, а низкое давление — о возникшей неисправности масляного насоса.

В качестве диагностируемых параметров могут выступать как структурные, по которым можно напрямую оценить работоспособность объекта диагностирования, но только после его разборки, так и косвенные параметры, позволяющие оценивать техническое состояние элемента, узла или агрегата без его разборки. К структурным параметрам можно отнести износ, зазор, натяг в сопряжениях и др. Косвенными параметрами являются: давление масла, рабочей жидкости, наддува; время цикла; содержание  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  в отработавших газах; расход рабочей жидкости, расход топлива; минимальные и максимальные обороты холостого хода двигателя и др. Именно эти параметры представляют максимальный интерес при создании универсальной системы, так как они косвенно характеризуют техническое состояние узлов и агрегатов [4].

Выбор диагностических параметров базируется на анализе статистических данных по эксплуатационным отказам и неисправностям СДМ. В результате анализа устанавливают наиболее часто повторяющиеся неисправности, которые и должны свидетельствовать о наступлении предотказного состояния отдельных конструктивных элементов. Это дает возможность определить значения критериев эксплуатационной надежности элементов машины, таких как остаточный ресурс, и выявить наименее надежные системы, которые подлежат диагностированию [5].

На рис. 1 приведен анализ отказов парка 60 экскаваторов-погрузчиков CAT 428, работающих на горнодобывающем предприятии “Разрез Нерюнгринский”. Данные по отказам получены от компании ООО “Восточная техника”, которая занимается сервисным обслуживанием техники Caterpillar. Обработаны данные по отказам машин, происходившим в 2006–2009 гг.

На рис. 1а показаны основные агрегаты, требующие постоянного мониторинга: гидрооборудование, двигатель, трансмиссия и электрооборудование, а также агрегаты, которым достаточно периодического обслуживания: рабочее оборудование, кузовные элементы, тормозная система, ходовое оборудование и система управления рабочим оборудованием.

Для каждого агрегата выбраны диагностические параметры, являющиеся необходимыми и достаточными для дистанционного определения текущего состояния:

- для двигателя — частота вращения коленчатого вала, температура охлаждающей жидкости, расход топлива, давление масла, давление наддува, температура окружающей среды;
- для коробки перемены передач — давление и температура масла, давление смазки;
- для гидравлической системы — давление масла гидронасоса;
- для электрооборудования — напряжение бортовой сети.

В целях сокращения элементов СМТС при установке на машину приоритетом при подключении пользуются штатные датчики, но в тех случаях, когда машина не имеет необходимых штатных датчиков, используются датчики, установленные дополнительно. Для измерения диагностических параметров и унификации СМТС подобраны датчики преимущественно из пневматических и гидравлических систем отечественных машин. Кроме них, для оценки технического состояния выбраны универсальные датчики, применяемые в горных и строительных машинах:

- датчик давления масла в двигателе, показатели которого косвенно характеризуют состояние сопряжений подшипников скольжения и состояния системы смазки двигателя;
- датчик давления во впускном коллекторе, информирующий о состоянии турбоагрегата;
- датчик температуры охлаждающей жидкости, характеризующий нагруженность двигателя;
- датчик температуры окружающей среды, оценивающий условия эксплуатации машины;
- датчик оборотов двигателя, информирующий о режимах работы машины во время выполнения технологических циклов, а также косвенно о состоянии ДВС и топливной аппаратуры в режиме максимальных оборотов холостого хода с нагрузкой и без нее;

- датчик давления смазки в коробке перемены передач (КПП), свидетельствующий об общем состоянии подшипниковых узлов;
- датчик давления рабочей жидкости в КПП, косвенно характеризующий общее техническое состояние фрикционных муфт, гидротрансформатора и масляного насоса КПП;
- датчик давления рабочей жидкости в гидросистеме, сигнализирующий о состоянии гидросистемы рабочего оборудования;
- система измерения напряжения бортовой электросети, которая фиксирует состояние электрооборудования (генератор, аккумулятор, стартер).

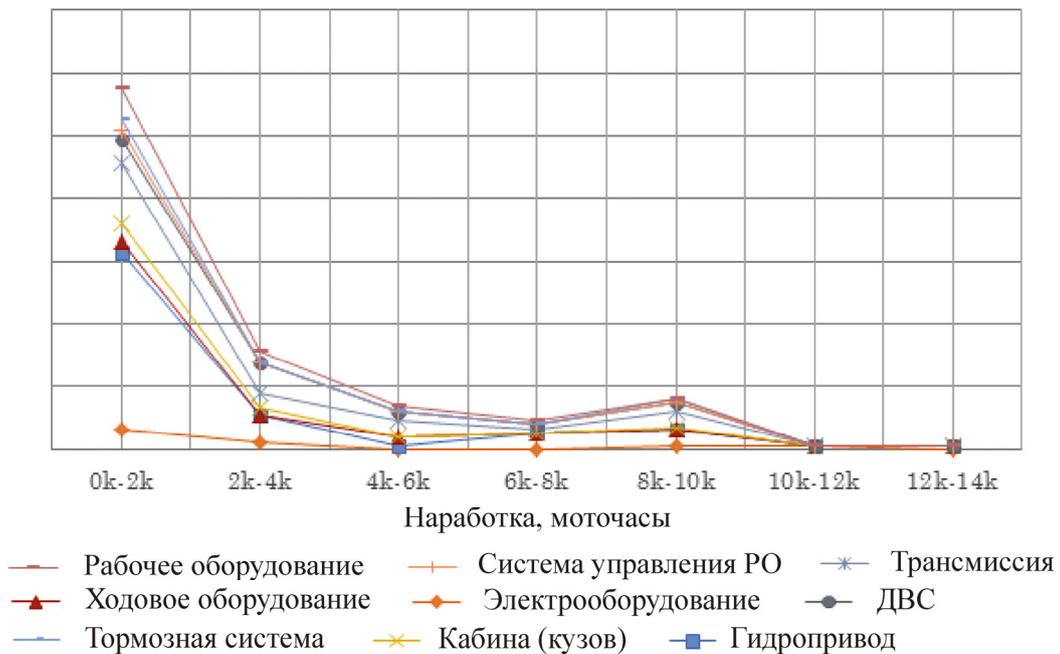
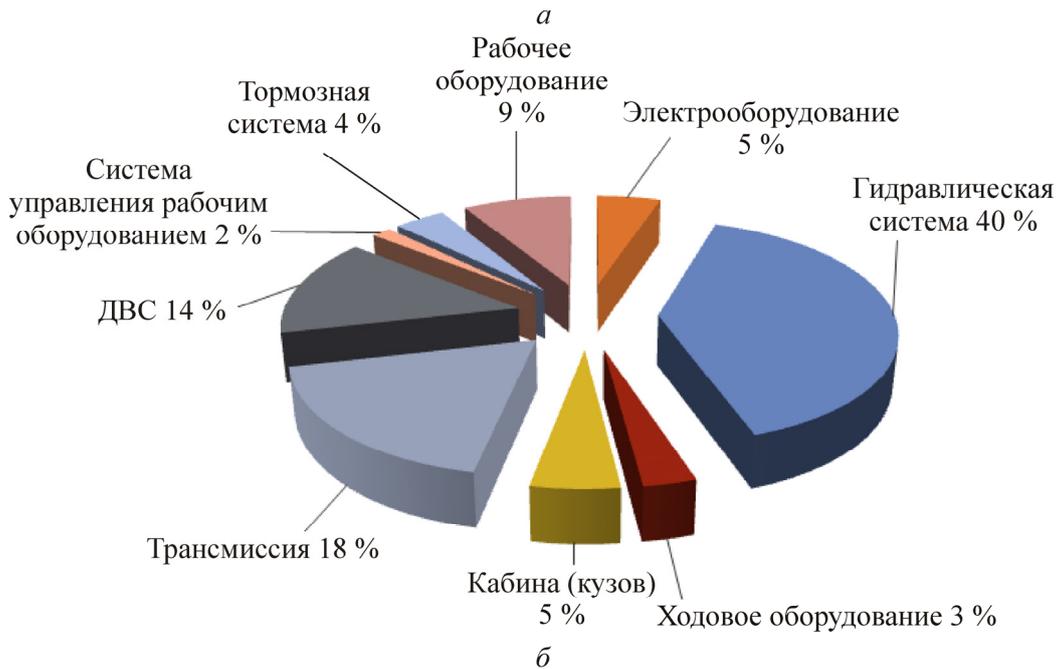


Рис. 1. Отказы основных агрегатов экскаваторов-погрузчиков: *a* — распределение отказов по системам машины; *b* — распределение отказов по наработке

Экспериментальное исследование режимов работы создаваемой СМТС проводилось на экскаваторе-погрузчике САТ 428Е, который использовался как натуральный стенд. Это дало возможность исследовать систему в производственных условиях в режиме реального времени.

СМТС была установлена в кабине оператора машины, что обеспечило удобство монтажа электрических цепей и исключило возможность повреждения устройства в процессе эксплуатации. Для удобства подключения и отключения датчиков применены быстроразъемные соединения (рис. 2в). Для герметичного соединения конструктивных элементов изготовлены специальные переходники, имеющие различные резьбовые присоединительные размеры. Пример переходника показан на рис. 2б.

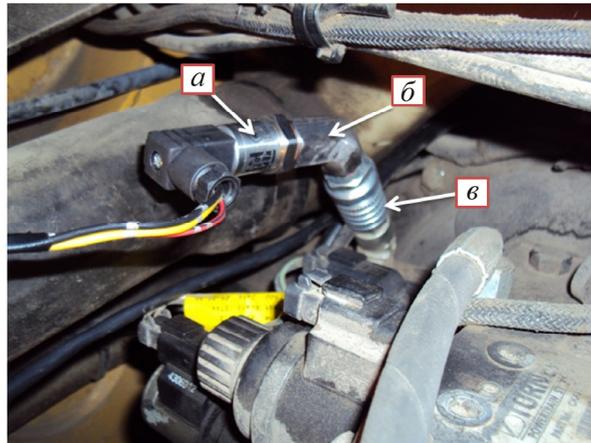


Рис. 2. Датчик давления масла в КПП: а — датчик; б — переходник, в — быстроразъемное соединение

После подключения к системе питания выполнялись настройка СМТС и тарировка датчиков с использованием компьютера, подключенного к системе через специальный адаптер. После установки датчиков система мониторинга технического состояния калибровалась по поверенным измерительным приборам. Диапазон измеряемых значений диагностических параметров выбирался из спецификаций завода-производителя на основе анализа данных предотказных состояний, полученных при предварительной диагностике машины. При настройке СМТС в память устройства вводились необходимые системные настройки, электронные адреса серверов баз данных, государственный регистрационный номер машины и др.

СМТС обеспечивала получение информации о текущем состоянии агрегатов и параметрах работы, производительности машины, а также о маршруте движения экскаватора во время рабочей смены.

Используя GSM связь, информация о работе машины передавалась на сервер, который производил ее обработку и сохранение в базе данных. По запросу обслуживающего персонала результаты мониторинга СДМ за определенный период времени выводились на экран. Структурная схема работы системы приведена на рис. 3.

Интерфейс программы включает карту с расположенными на ней метками, показывающими местоположение и маршрут движения машины, а также параметры работы машины в реальном времени (рис. 4).

Параметры работы экскаватора представлялись в отчетах в виде графиков, а средние значения параметров и значения счетчиков — в виде таблиц. Сведения о состоянии экскаватора выдавались ежедневно, а также в моменты, когда фиксировались значимые события — превышение значения диагностического параметра, простои экскаватора, заправка, слив топлива.

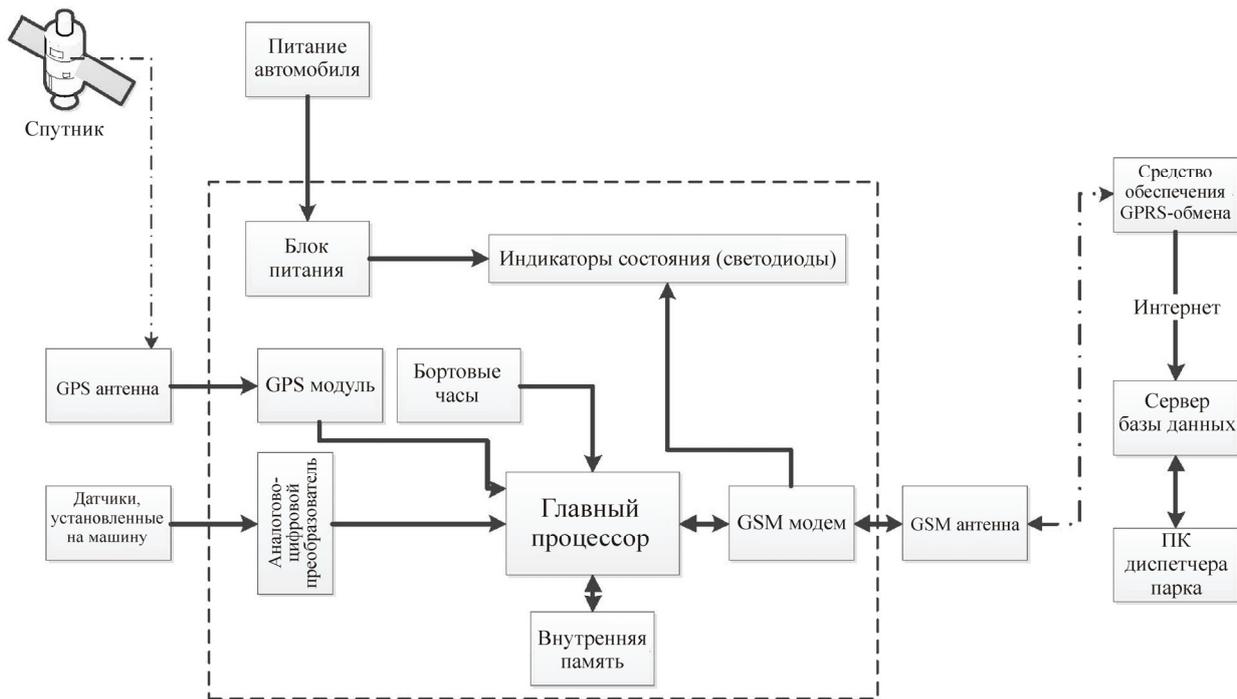


Рис. 3. Структурная схема СМТС

▲ **Настройки отчёта**

ТС:       Период: От:      До:

---

▲ **Отчет в цифрах**

Начало периода:	Сентябрь 26, 2012 00:00:00		Время работы двигателя:	17ч 54мин
Конец периода:	Октябрь 09, 2012 23:59:59		Моточасы [?]:	14.8 мч
Пройденный путь (GPS датч):	109.7   105.0	км	Средние обороты двигателя:	1354 об/мин
Время в движении (GPS датч):	6ч 55мин   6ч 40мин		Средняя температура двигателя:	74 °C
Средняя скорость (GPS датч):	11   7	км/ч	Среднее давление масла в двигателе:	293 кПа
Максимальная скорость (GPS датч):	38   30	км/ч	Средняя нагрузка ведущей оси:	25.0 т

---

▲ **Карта**

Рис. 4. Интерфейс программы

При входе на сервер под своим логином и паролем инженер-диагност получает возможность отследить состояние того или иного агрегата через анализ графиков, пример которых представлен на рис. 5, 6.



Рис. 5. График изменения температуры двигателя (охлаждающей жидкости)



Рис. 6. График давления насоса коробки перемены передач

В алгоритме анализа определены предельные значения для каждого диагностического параметра, а также опасные зоны, близкие к минимальным и максимальным значениям; частое появление параметра в опасной зоне сигнализирует о возможном появлении отказа или неправильной эксплуатации машины [6]. Основным критерием оценки диагностических параметров является скорость изменения среднего значения параметра, которое инженер может наблюдать на мониторе сервера обработки данных.

За период работы системы в базе данных сохраняется информация за несколько месяцев работы экскаватора-погрузчика САТ-428Е. Машина эксплуатировалась в разных производственных условиях с вариацией режимов работы, и за это время не зафиксировано ни одного отказа СМТС.

Это свидетельствует о надежности системы и доказывает возможность проведения с ее помощью непрерывной дистанционной диагностики СДМ. При таком подходе возможно накопление информации о состоянии СДМ и формирование баз данных для прогнозирования возникновения отказа, вычисления производительности, а также определения необходимости ремонтных воздействий. В частности, если возникает предотказное состояние агрегата, диспетчер-диагност может запросить данные об изменении технического состояния за определенный промежуток времени. На основе полученных результатов, при сравнении номинальных и фактических характеристик, ставится предварительный диагноз.

Если по имеющимся данным можно поставить достоверный диагноз, то назначается время выполнения необходимого технического воздействия, при котором устраняется предотказное состояние. В сомнительных случаях дается рекомендация на углубленное диагностирование только неисправного агрегата, системы или узла.

#### ВЫВОДЫ

1. В результате выполненной работы создан и экспериментально проверен прототип системы дистанционной диагностики, позволяющий удаленно контролировать техническое состояние машины, определять оптимальное время проведения технических воздействий, а также определять остаточный ресурс.

2. Для наиболее эффективного использования СМТС и устранения ошибок, вызванных человеческим фактором (невнимательность диспетчера при анализе диагностических параметров, недостаток опыта оператора при эксплуатации машины), необходимо переходить к разработке автоматизированной системы анализа параметров, определения аварийных режимов, неэффективного использования машин, а также определения квалификации операторов, напрямую влияющих на производительность и безотказность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taku Murakami and Takaichi Saigo.** Development of vehicle health monitoring system (VHMS) in webCARE for large-sized construction machine, Komatsu technical report, Japan, 2002.
2. **Vital Information Management System (VIMS):** system operation testing and adjusting, Caterpillar, Inc., 1999, Company publication.
3. **Заявка № 2012142455/08(068292) РФ, МПК G07C 5/00.** Система мониторинга технического состояния транспортного средства / А. Л. Манаков, А. А. Игумнов, А. Ю. Кирпичников / ФГБОУ ВПО СГУПС, заявл. 04.10.12.
4. **ГОСТ 20911-89.** Техническая диагностика. Термины и определения. — Введ. 1991-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1991. Взамен ГОСТ 20911-75.
5. **Сергеев А. Г., Ютт В. Е.** Диагностирование электрооборудования автомобилей. — М.: Транспорт, 1987.
6. **ГОСТ 27.410-87.** Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. — Введ. 1989-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1989.

*Поступила в редакцию 23/V 2013*