

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

СТЮАРТ СЕРВИС (STUART SERVIS)

ПЕРЕВОД: МИХАИЛ РУССКИХ

tau68@rambler.ru

Благодаря возросшему количеству подключенных к сети устройств у нас появилась возможность наблюдать за физическим миром как никогда раньше и видеть физические процессы в реальном времени и в мельчайших подробностях. В промышленных системах одним из таких важных процессов является износ оборудования и механизмов. Этот фактор необходимо учитывать вне зависимости от отрасли промышленности, будь то нефтегазовая отрасль, ветроэнергетика или сфера управления производственными процессами. Во всех этих случаях затраты на капитальный ремонт оборудования весьма высоки и время простоя обходится очень дорого. В статье рассмотрим системы мониторинга состояния оборудования (СбМ), используемые в рамках «Индустрии 4.0» и схожие по принципу действия с носимыми фитнес-устройствами.

Затраты при незапланированных простоях производства могут достигать тысяч долларов в час. Одно исследование, проведенное в 2017 г., показало, что компании, участвовавшие в опросе, потеряли в среднем по \$2 млн только из-за простоев, при этом внеплановые простои обошлись значительно дороже, чем плановое обслуживание, поскольку в первом случае оборудование должно быть отключено на время, пока ведутся работы по диагностике неисправно-

сти, заказываются запчасти и производится ремонт.

На непрерывную работу промышленных механизмов в пределах технического регламента и на ожидаемый срок их службы влияют такие факторы, как время работы, меняющиеся нагрузки и условия эксплуатации, а также события, приводящие к повреждениям. Благодаря мониторингу состояния оборудования можно количественно оценивать эти виды воздействия и получать предупреждения в случаях, когда необходимо проведение безотлагательных работ, при этом такой мониторинг позволяет точно прогнозировать, когда потребуются вмешательства в работу оборудования.

Каждый промышленный механизм индивидуален и изнашивается по-своему, при этом данный процесс, как правило, протекает медленно и незаметно. Если мы не будем активно искать признаки малейших изменений, проявляющихся с течением времени, до какого-то момента износ может оставаться незамеченным. Но в итоге внезапно произойдет сбой — возможно, катастрофический, то есть промышленный механизм выйдет из строя и потребуются его ремонт. Конечным пользователям промышленно-

го оборудования важно заранее знать о приближающемся сбое, чтобы запланировать время простоя. Они также ищут индикаторы менее заметных изменений в оборудовании, которые могут повлиять на качество их конечного продукта.

Потребность в более раннем обнаружении износа оборудования и в достоверной информации о качестве продукции, выпускаемой с помощью этого оборудования, приводит к необходимости получать в результате измерений более точные и всеобъемлющие данные. Методов измерений становится все больше. Например, измерения температуры и вибрации дополняются акустическими измерениями, измерениями напряжения и тока двигателя. Различные системы измерения объединяются, что позволяет получать более целостное представление о состоянии оборудования. В связи с этим количество каналов измерения на один механизм увеличивается. Отдельные процессы измерения часто необходимо синхронизировать, чтобы отобразить взаимосвязь, например, между данными о вибрации, получаемыми в результате измерений по осям x, y и z. Потребность в такой синхронизации еще больше повышает сложность систем.

РИС. 1. ▼
Осмотр оборудования вручную с помощью пьезодатчиков и портативного регистратора



Растущее количество узлов и методов измерения означает, что процедуры проверок и измерений вручную (рис. 1) постепенно уходят в прошлое. Современные системы применяются в рамках производственного цеха или на удаленной промплощадке с возможностью подключения сетевой связи, организованной с использованием существующей проводной инфраструктуры или с помощью беспроводной связи на основе надежных и безопасных беспроводных систем. Громоздкие и дорогие датчики и агрегаторы данных должны стать меньше, дешевле и энергоэффективнее, чтобы соответствовать этим условиям.

Сегодня на рынке уже представлены новые прецизионные решения на уровне компонентов и подсистем с более высокими уровнями интеграции, которые позволяют разработчикам реализовывать высокоточные системы измерения.

СБОР ДАННЫХ

Чтобы заранее узнать степень износа промышленного механизма, пользователю, образно говоря, придется заглянуть в будущее. В рамках аналитики данных, полученных благодаря мониторингу состояния оборудования, это достигается путем поиска мельчайших изменений в системе, будь то изменение температуры, вибрации или акустических характеристик. Чтобы измерить такие небольшие изменения, требуются датчики и системы сбора данных, с помощью которых можно зарегистрировать изменения еще на начальных уровнях обнаружения, даже в условиях сильной вибрации или высокой температуры. При этом необходимы сигнальные цепи с очень высоким динамическим диапазоном, то есть системы с очень низкими собственными шумами, которые могут проводить измерения в условиях больших колебаний уровня сигнала. Например, для выявления начала износа поршневого насоса следует обнаружить изменение менее чем на 0,1 мм от положения конечного хода поршня, при этом поршень может перемещаться на расстояние до 300 мм. Чтобы мы смогли увидеть такое изменение, системный шум должен быть ниже значения данного изменения как минимум в 10 раз. Из-за этого диапазон обнаружения увеличивается до 1:300000, или 109 дБ,

в связи с чем необходимо использовать системы сбора данных с точностью от 18 бит.

Кроме того, для успешной реализации системы мониторинга состояния оборудования требуется выйти за пределы интересующей нас полосы пропускания. Оси двигателей и многие системы зубчатых передач работают с характерными колебаниями на относительно низких частотах, близких к скорости вращения оси или кратных ей на незначительные величины. Однако в системах имеются и другие компоненты, которые обладают более высокочастотными характеристиками. Для обнаружения изменений, являющихся признаками износа компонентов с более высокими частотными характеристиками, таких как шариковые и масляные подшипники, датчик должен обеспечивать высокое разрешение и широкий динамический диапазон при частотах 10–80 кГц (рис. 2).

Высококачественная система измерения должна иметь широкий динамический диапазон, а также очень низкий общий коэффициент гармонических искажений, чтобы выявить все необходимые изменения в частотной области при измерении вибрации системы. В таких системах для выполнения аналого-цифрового преобразования используются новейшие прецизионные сигма-дельта ($\Sigma-\Delta$) преобразователи с широкой полосой пропускания. Сегодня доступны очень точные аналого-цифровые преобразователи, отвечающие основным требованиям для систем мониторинга. Динамический диапазон преобразователей данной категории составляет +108 дБ, а коэффициент гармонических искажений — -120 дБ, и такие показатели обеспечиваются в полосе пропускания от низких частот до 80 кГц и выше. При этом данные преобразователи также обладают простыми в использовании функциональными блоками, такими как аналоговые входные буферы предварительной зарядки, встроенные цифровые фильтры и механизм синхронизации между устройствами для многоканального согласования фаз, благодаря чему эти компоненты оптимальны для создания систем сбора данных, предназначенных для мониторинга состояния оборудования с высочайшими рабочими характеристиками. Функции масштабирования энергопотребления позво-

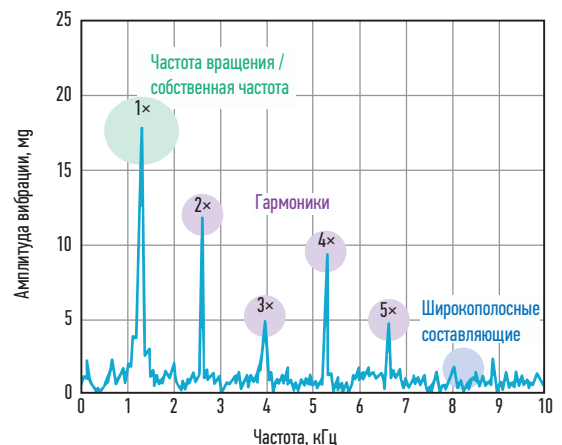
ляют изменять уровень потребления энергии одного и того же физического оборудования в соответствии с конкретными пределами мощности, при этом динамический диапазон или полосу пропускания можно подстраивать под необходимое энергопотребление. Благодаря обеспечению высокой точности измерений в низкочастотном диапазоне, а также более широкой полосе входные каналы в составе одной и той же платформы могут измерять температуру, сигналы деформации и другие медленно меняющиеся параметры или узкополосные сигналы, что упрощает архитектуру и уменьшает сложность системы мониторинга состояния оборудования: в итоге можно создать единую платформу для всех типов датчиков системы мониторинга состояния оборудования.

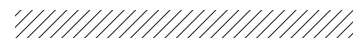
ОДНОВРЕМЕННАЯ ВЫБОРКА

В системах мониторинга состояния оборудования возможность одновременной выборки используется для того, чтобы обеспечивать сохранение фазовых соотношений между наборами данных во временной области. Например, если для измерения вибрации применяются два ортогонально расположенных датчика, то выборка позволит определять направление и амплитуду векторов вибрации. В идеале фазовые задержки в каждом входном тракте датчика должны быть точно согласованы, при этом должна быть учтена возможность их изменения в зависимости от температуры.

Для применения в системах мониторинга состояния оборудования, требующих более широкого диа-

РИС. 2. ▾
Типичная частотная характеристика вибрации





пазона частот дискретизации, более широкой полосы пропускания или возможности масштабирования энергопотребления также подходят АЦП последовательного приближения. Эти устройства имеют широкий динамический диапазон, низкий коэффициент гармонических искажений и скорость преобразования до 2 MSPS, а также содержат простые в использовании функции, которые снижают энергопотребление сигнальной цепи, уменьшают ее сложность и обеспечивают более высокую плотность каналов. Преобразователи с режимами, предусматривающими более высокий входной импеданс, позволяют расширить выбор малопотребляющих прецизионных усилителей, которые можно подключать непосредственно к таким АЦП, гарантируя при этом поддержание оптимальных рабочих характеристик.

Чтобы достичь максимально возможной плотности каналов в более компактных или распределенных узлах сбора данных, а также сократить время вывода продукции на рынок, разработчики систем могут использовать продукты серии μ Module компании Analog Devices с высоким уровнем интеграции.

В устройствах серии μ Module, выпускаемых в компактном формате микросхемного исполнения, содержатся компоненты, которые, как правило, встречаются в сигнальных цепях систем сбора данных (рис. 3).

Благодаря подходу, используемому при создании продуктов серии μ Module, разработчики освобождаются от решения задач по проектированию, выбору, оптимизации и расположению компонентов для обработки аналоговых и смешанных сигналов, что позволяет сократить общее время разработки и время на отладку системы, а также в итоге сократить время вывода продукта на рынок. Устройства серии μ Module выпускаются в очень компактных корпусах и являются оптимальным вариантом для применения в распределенных системах с малым количеством каналов, небольших системах мониторинга состояния оборудования или модульных системах с большим количеством каналов.

ДАТЧИКИ

Обеспечение в сигнальной цепи системы сбора данных широкого динамического диапазона, более широкой полосы пропускания, большей энергоэффективности и более высокой плотности каналов решает лишь часть задач при проектировании системы мониторинга состояния оборудования. Так, традиционные пьезоэлектрические датчики вибрации со встроенной электроникой (IEPE) являются довольно большими, громоздкими и дорогими устройствами и, как правило, питаются от шин с более высоким напряжением, чем напряжение питания системы сбора данных. Для питания стандартных пьезоэлектрических датчиков используется однополярный

источник с выходным напряжением -24 В, при этом такие датчики могут потреблять ток до 2 мА и выпускаться в корпусах из тяжелого металла. Поскольку напряжение питания для датчиков обычно обеспечивается модулем сбора данных, увеличение плотности каналов в одном корпусе приводит к сложностям, связанным с ограничениями плотности мощности и компонентов. Если также учитывать необходимость применения беспроводных узлов сбора данных с батарейным питанием, то традиционный пьезоэлектрический датчик вибрации не отвечает требованиям этих сигнальных цепей.

Современным требованиям соответствуют вибрационные и инерциальные МЭМС-датчики. Новые МЭМС-устройства с широкой полосой пропускания и отличными шумовыми характеристиками хорошо подходят для применения в системах мониторинга состояния оборудования, при этом они выпускаются в миниатюрных стандартных корпусах для поверхностного монтажа и обладают уровнями энергопотребления, которые в 20 раз ниже, чем у сопоставимых датчиков стандарта IEPЕ. Благодаря малым размерам и низкому энергопотреблению МЭМС-датчиков можно разрабатывать очень компактные многоосевые системы с батарейным питанием для систем непрерывного мониторинга состояния оборудования.

ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ И СВЯЗЬ

Измерение температуры, вибрации или шума промышленного механизма и преобразование полученной информации в цифровую форму являются основными задачами систем мониторинга состояния оборудования, но эти данные не дают полной картины. Для создания качественной системы необходимо уделять пристальное внимание всем аспектам по обработке аналоговых, цифровых и смешанных сигналов. Чтобы достичь низкого уровня шума в сигнальной цепи системы сбора данных, требуются не только малошумящие датчики и компоненты аналого-цифрового преобразования, но и схемотехнические решения, обеспечивающие низкий уровень шума (рис. 4). А для достижения низкого энергопотребления в системе также необходимы компоненты питания,

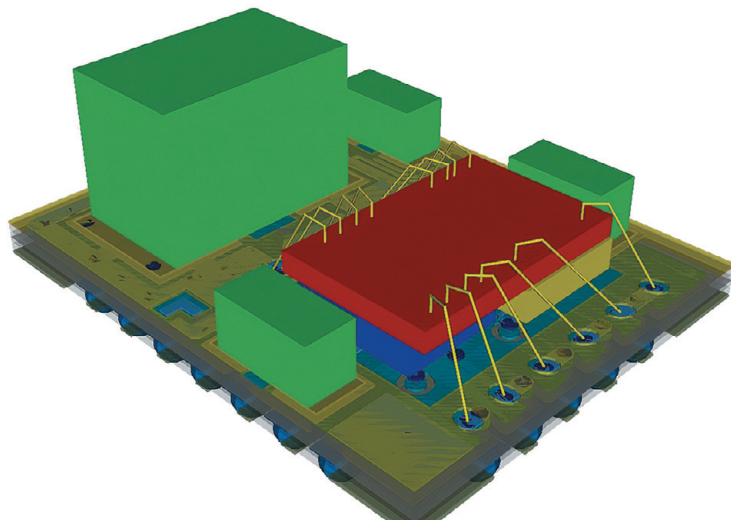


РИС. 3. ►
Трехмерная модель сборки серии μ Module

которые эффективно преобразуют энергию, получаемую от батарей или проводной шины питания, не усложняя при этом конструкцию конечного устройства.

Организация определенной сетевой связи зависит от конкретной среды, в которой используется система мониторинга. На многих промышленных предприятиях уже есть сетевая проводка, предназначенная для управления технологическим процессом или подключения существующих датчиков (для измерения параметров окружающей среды, например температуры). Однако большая часть такой инфраструктуры может быть не в состоянии пропускать через себя большие объемы исходных данных или не может обеспечивать скорость передачи данных, необходимую для широкомасштабного мониторинга состояния оборудования.

Один из способов решения этой задачи — расширение возможностей существующей проводки по передаче дополнительных данных, при этом данные должны передаваться так, чтобы они не повлияли на существующие функции связи. Например, можно использовать технологию HART для добавления диагностической информации в цифровой форме к сигналам широко распространенного аналогового интерфейса токовой петли 4–20 мА. Аналогичным образом протоколы промышленного Ethernet обеспечивают детерминизм и возможности управления в реальном времени там, где уже проложена кабельная сеть Ethernet, благодаря чему в системах управления предусматривается заранее известная задержка, а также более широкая полоса пропускания, когда требуются данные вибрации или быстрого преобразования Фурье. Помимо прочего, это позволяет подключать несколько узлов к каждому каналу.

Другой подход заключается в передаче информации по беспроводной сети. В промышленной среде требуется надежная и безопасная беспроводная сеть. Для этого не так давно были разработаны решения для организации интеллектуальной радиосвязи с ячеистой топологией (MESH), которые представляют собой беспроводные микросхемы и предварительно сертифицированные модули на печатных платах, обеспечивающие связь с низким энергопотреблением

и надежную передачу данных с гарантией доставки информации >99,999% даже в суровых и динамично изменяющихся радиочастотных средах. В контексте систем мониторинга состояния оборудования это означает, что информация о сбоях или переходных процессах гарантированно будет передана на хост, что позволит устранить неисправности в кратчайшие сроки.

БУДУЩЕЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Мониторинг состояния необходим для оборудования, эксплуатация которого может сопровождаться большими капитальными затратами. Например, его важно обеспечить для оборудования энергетической и нефтегазовой отраслей, где незапланированные простои сильно влияют на производственные затраты. Реализация систем мониторинга состояния оборудования также становится необходимой в рамках производственных цехов, где такие системы можно использовать как в качестве средств для организации предварительного технического обслуживания механизмов, так и в качестве средств обеспечения того, чтобы оборудование производило продукцию согласованным образом в штатном режиме работы. Когда значимость систем мониторинга состояния оборудования станет более очевидной, их будут применять во все большем количестве механизмов, которые мы используем каждый день. Эта технология больше не будет прерогативой ветряных турбин или бумажных фабрик: системы мониторинга будут использоваться в поездах, самолетах и автомобилях, а в итоге и в стиральных машинах, и даже более мелких бытовых приборах.

Производители компонентов системы будут интегрировать датчики или даже всю сигнальную цепь

канала в свою продукцию. Двигатели будут поставляться со встроенными датчиками вибрации и тока, и то же касается подшипников и редукторов. На рынке появятся автономные сенсорные узлы, которые будут передавать информацию на мобильные устройства. Например, такой сенсорный узел можно будет установить на гаражных воротах, чтобы он мог сообщать о возможности выезда машины.

Чтобы реализовать концепцию мониторинга состояния в различных областях применения, производителям оборудования необходимо будет использовать платформенный подход, при котором всего несколько платформ смогут удовлетворить разнообразные потребности в мониторинге. Каналы измерения должны иметь возможность принимать сигналы от различных типов датчиков, чтобы модульное оборудование можно было использовать с различными комбинациями датчиков. Системы, применяемые в компактном оборудовании, должны быть адаптированы для работы с различными уровнями энергопотребления, чтобы один и тот же узел мониторинга можно было использовать в стиральной машине или инструменте с батарейным питанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния оборудования предназначен для количественной оценки состояния промышленных механизмов путем измерения их различных параметров. Благодаря повышению точности и чувствительности этих измерительных систем, а также уменьшению размера, веса и энергопотребления оборудования для мониторинга руководители предприятий теперь могут внедрять такие системы мониторинга на всех производственных площадках своих предприятий.

Пользователям уже доступны современные средства мониторинга

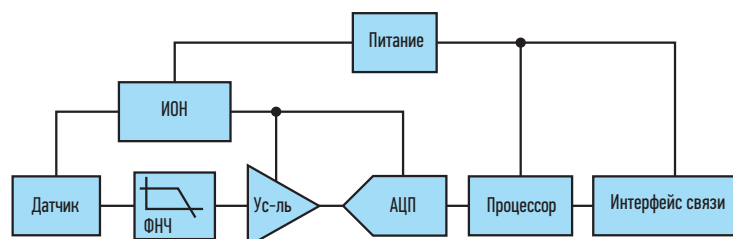
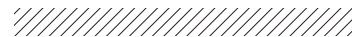


РИС. 4. ◀
Блок-схема, в которой показаны подблочки типичной сигнальной цепи прецизионной системы сбора данных



«здоровья» оборудования — своеобразные фитнес-трекеры, которые повышают уровень информированности о текущей производственной деятельности. Руководители предприятий могут получать информацию о мельчайших изменениях в работе промышленных механизмов, чтобы на ее основе принимать своевременные и обоснованные решения.

Заблаговременное планирование технического обслуживания и точная оценка его необходимости могут значительно снизить затраты на него. Расходы на вызов технических специалистов по ремонту оборудования в нерабочее время в результате можно свести к нулю.

Благодаря более высокому уровню контроля производственных процессов можно существенно сократить капитальные затраты на оборудование. Заблаговременное обнаружение и замена изношенных компонентов позволяют продлить срок эксплуатации промышленных механизмов, а более точные системы мониторинга состояния — снизить вероятность

возникновения сбоев, приводящих к катастрофическим последствиям. При этом благодаря тщательному контролю состояния срок службы оборудования может значительно увеличиться.

Помимо этого, такие системы мониторинга позволяют снизить стоимость производства конечного продукта. Благодаря информации о состоянии оборудования появляется возможность контролировать допустимые отклонения параметров работы механизмов. Качество готовой продукции будет одинаково стабильным и высоким вне зависимости от партии. В результате будет снижена вероятность выхода рабочих параметров механизма за пределы допустимого диапазона или его внезапной остановки. Таким образом, сократятся количество работ по повторному выпуску продукта и количество брака.

Компания Analog Devices разработала устройства для мониторинга, отвечающие современным требованиям и позволяющие повысить эффективность и продлить срок

службы установленного на предприятии оборудования.

Чтобы реализовать мониторинг состояния оборудования, можно составить технологическое решение на основе комбинации данных устройств — причем не только на уровне компонентов, уже известных большинству заказчиков, но теперь и на более высоких уровнях интеграции благодаря устройствам серии μ Module. В серию включены все необходимые сигнальные цепи, а также продукты питания, которые позволяют сократить время по созданию прототипа или разработке жизнеспособного продукта.

Компания может предоставить предприятию законченную сигнальную цепь со всеми требующимися компонентами, начиная от малопотребляющих МЭМС-датчиков, высококачественных и энергоэффективных преобразователей данных до компонентов беспроводной связи и микросхем управления питанием. Доступны варианты как для модульных систем, так и для распределенных узлов мониторинга. ●