

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

С.Ю. Трутаев (АО «ИркутскНИИхиммаш»)

Представлено описание технологии оценки технического состояния и обеспечения промышленной безопасности динамически нагруженного оборудования опасных производственных объектов таких промышленных отраслей, как нефтепереработка, химия и нефтехимия, нефте- и газодобыча. В качестве основы для определения текущего технического состояния контролируемого объекта предложено использовать специальный расчетно-экспериментальный метод, позволяющий выполнять достоверную оценку возникающих в оборудовании во время эксплуатации напряжений и деформаций по ограниченному числу измеряемых контрольных параметров. Представленная технология прошла масштабную апробацию применительно к оборудованию ряда ОПО различных предприятий РФ и легла в основу нормативно-методических документов РД 0154-13, СТО-00220227-044, ГОСТ Р 555431. Для обеспечения применения предложенной технологии оценки технического состояния разработано специализированное программное обеспечение, представленное семью независимыми программными комплексами (MStruct, SIdent, Stand, Norma, Correlation, CPipes, Compass), используемыми на различных этапах ее внедрения.

Ключевые слова: опасный производственный объект, оценка технического состояния, расчетно-экспериментальные методы исследования, мониторинг технического состояния, программное обеспечение, метод конечных элементов, математическая модель, идентификация.

Анализ современного состояния проблемы обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО) [1] указывает на наличие устойчивой тенденции развития современных промышленных предприятий РФ в направлении внедрения новейших стратегий технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР), в том числе на основе прямого копирования зарубежного опыта. В большинстве случаев крупные предприятия, такие как АО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Лукойл» и т. д., отдают предпочтение таким стратегиям, как ТОиР по фактическому состоянию (СВМ), ТОиР, ориентированное на надежность (RSM), ТОиР на основе анализа и оценки рисков (RBM) и ряд др. В теории внедрение подобных практик ТОиР должно приводить к росту капитализации предприятий за счет минимизации всех видов простоев, которые могут повлиять на выпуск конечного продукта, а также снижения затратной части бюджета в части обслуживания и ремонта оборудования. Однако на практике готовность многих предприятий к новому порядку ТОиР оказывается настолько низкой, что вместо четкого и отлаженного механизма управления промышленной и экологической безопасностью результатом нововведений становится стремительно снижающийся уровень надежности оборудования, а в ряде случаев и лавинообразный рост аварийных ситуаций на ОПО. Сложившаяся ситуация объясняется рядом факторов. Здесь сказывается и значительный износ оборудования предприятий, и отсутствие развитой инфраструктуры технической эксплуатации, несовершенная законодательная и нормативная база и т. д. На многих предприятиях недостаточно полно используются возможности современного развития диагностической техники и информационных систем — как правило, производства ограничиваются внедрением только систем мониторинга текущего состояния оборудова-

ния, без внедрения методов диагностики и прогноза развивающихся дефектов, методов анализа надежности. Это приводит к несвоевременному и неэффективному восстанавливающему техническое состояние ТОиР, а отсутствие программ прогнозирования дефектов, квалифицированного персонала, способного выполнить количественный и качественный анализ технического состояния оборудования, приводит к неплановым остановам, авральным ремонтам, неритмичной загрузке ремонтных производств и т. д.

Для целого класса технических объектов (технологические и обвязочные трубопроводы, сосуды и аппараты, колонное оборудование, технологические эстакады и др.), для которых решение вопросов обеспечения промышленной безопасности в условиях действующих производств на первый взгляд является тривиальной задачей, на практике приходится сталкиваться с необходимостью учета факторов, которые на этапе проектирования не рассматривались, а во время эксплуатации вносят существенный, а в ряде случаев определяющий вклад в техническое состояние объекта. К таким факторам следует отнести, в частности, фактор динамических нагрузок, которые при проектировании и вводе производств в эксплуатацию, как правило, не рассматриваются, а при расчете ресурса оборудования во внимание принимаются лишь малоцикловые нагрузки, связанные, прежде всего, с технологическими пусками и остановами, изменениями режимов работы и т. д. Так, например, известно, что неотъемлемой частью эксплуатации насосно-компрессорного оборудования являются проблемы, связанные с высоким уровнем вибрации трубопроводных обвязок, межступенчатых аппаратов, компрессорных агрегатов [2] и т. д. Особенно это характерно для установок, оснащенных поршневыми компрессорами, а также технологического оборудования, работающего совместно с центробежными нагнетателями, перекачивающими высоковязкие или

высокотемпературные среды. При проектировании подобных объектов основное внимание уделяется технологическим вопросам, а вопросы размещения и закрепления оборудования решаются без расчета спектра частот свободных колебаний и проверки системы на резонанс. В результате при эксплуатации в условиях реальных производств оборудование подвергается воздействию непредусмотренных проектом динамических нагрузок, длительное действие которых в сочетании с другими факторами становится причиной усталостного разрушения отдельных его элементов и, как следствие, приводит к появлению аварийных ситуаций на ОПО, человеческим и материальным потерям, загрязнению окружающей среды.

В целях обеспечения промышленной безопасности отмеченных выше групп динамически нагруженного оборудования ОПО в ИркутскНИИХиммаш разработана технология оценки технического состояния (СТО-00220227-044-2016 «Оборудование опасных производственных объектов. Расчетно — экспериментальные методы исследования»), базирующаяся на результатах расчетно-экспериментальных оценок состояния оборудования ОПО I и II класса опасности (ФЗ от 21.07.1997 № 116 (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопас-

ности опасных производственных объектов») по результатам периодического/постоянного мониторинга контрольных параметров. Структурная схема реализации данной технологии на практике показана на рис. 1.

На первом этапе применения технологии промышленное оборудование предприятия подвергается первичному (предварительному) освидетельствованию, по результатам которого определяется вклад, вносимый фактором динамического нагружения в общее техническое и напряженно-деформируемое состояние (ТС и НДС) исследуемого объекта. Это дает основание разделить оборудование на две группы критичности, для каждой из которых предлагается использовать различные по своему составу стратегии контроля состояния оборудования во время эксплуатации, а также объем внедрения средств повышения динамической стойкости.

Для оборудования I группы критичности предлагается применять стратегию постоянного мониторинга состояния оборудования с параллельным внедрением пассивных или полуактивных средств управления динамическим состоянием оборудования. В качестве основы для определения текущего технического состояния контролируемого объекта применяется специальный расчетно-экспериментальный метод (ГОСТ Р 55431-2013 «Си-

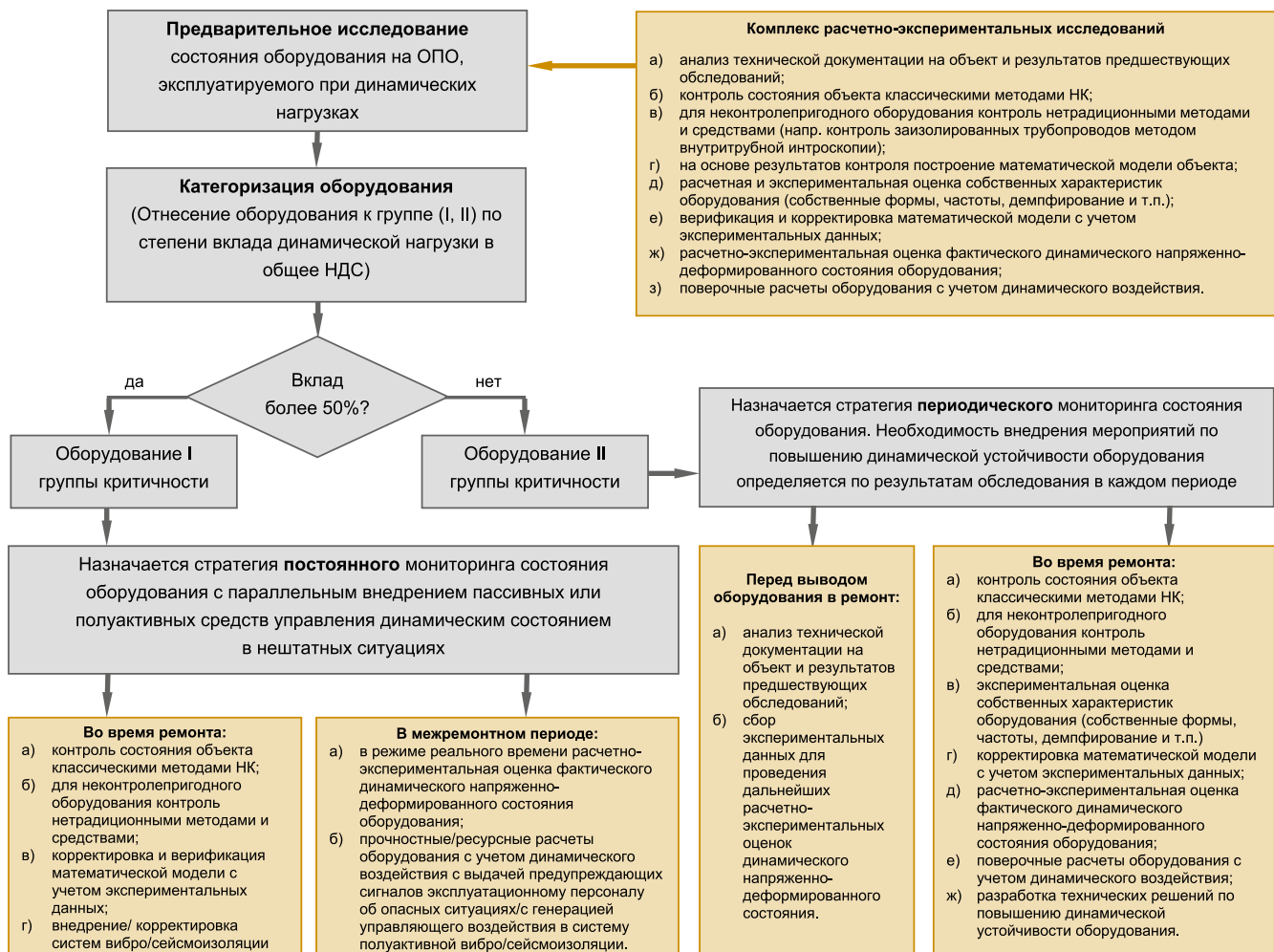


Рис. 1. Технология оценки технического состояния динамически нагруженного оборудования ОПО

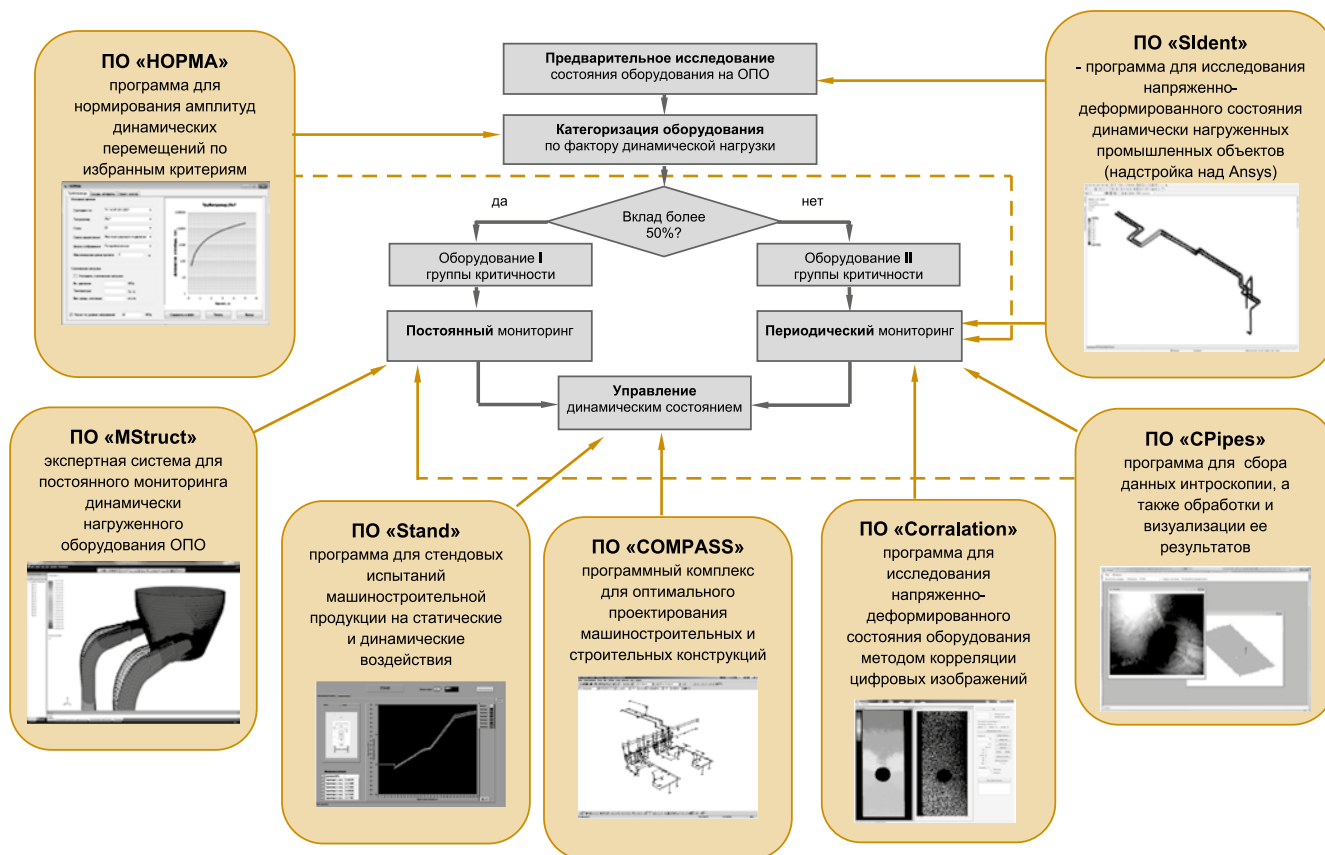


Рис. 2. ПО технологии оценки технического состояния динамически нагруженного оборудования ОПО

стемы трубопроводные. Расчетно-экспериментальный метод оценки динамического напряженно-деформированного состояния), позволяющий выполнять достоверную оценку возникающих в оборудовании во время эксплуатации напряжений и деформаций по ограниченному числу измеряемых контрольных параметров. Метод прошел многолетнюю масштабную апробацию и верификацию при исследовании динамического отклика реальных объектов на действующих технологических установках АО «Ангарская нефтехимическая компания» (АО «АНХК»), АО «Ангарский завод полимеров» (АО «АЗП»), АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания» (АО «РНПК»), АО «Газпром нефтехим Салават», АО «Саянскхимпласт» и др. Он основан на том, что поле динамических параметров объекта (например, перемещений, деформаций) может быть аппроксимировано полями динамических параметров, соответствующих собственным формам его колебаний. При этом исследуемый объект представляется в виде упругой механической системы с конечным числом степеней свободы, что позволяет организовать решение задачи с применением известных численных методов, например, метода конечных элементов (МКЭ) [3, 4]. В этом случае уравнение динамики такой системы может быть записано в виде [5]:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\delta}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\delta}\} + [\mathbf{K}]\{\delta\} = \{\mathbf{P}(t)\},$$

где  $[\mathbf{K}]$ ,  $[\mathbf{C}]$ ,  $[\mathbf{M}]$  — матрицы жесткости, демпфирования и масс системы;  $\{\mathbf{P}(t)\}$  — вектор динамической

нагрузки общего вида. При этом динамическая реакция объекта в момент времени  $t$  аппроксимируется параметрами состояния объекта (перемещения, деформации, силовые факторы и т.п.), соответствующими собственным формам его колебаний:

$$\{\mathbf{D}(t)\} = [\mathbf{\Phi}]\{\mathbf{d}(t)\},$$

где  $\{\mathbf{d}(t)\}$  — представляет собой вектор обобщенных координат размерностью  $m_\Phi$ , а матрица  $[\mathbf{\Phi}]$  включает  $m_\Phi$  векторов  $\{\mathbf{\Phi}_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, m_\Phi$ , содержащих параметры состояния модели соответствующих  $k$ -ой форме колебаний объекта.

Для оборудования II группы критичности (рис. 1), для которого вклад фактора динамической нагрузки в общее техническое состояние  $\leq 50\%$ , применение средств постоянного мониторинга является избыточным. Поэтому в этом случае целесообразным является использование стратегии периодического мониторинга, когда обследование динамического состояния оборудования осуществляется с заданной периодичностью, например с периодом, соответствующим межремонтному интервалу технологической установки. Состав такого обследования определяется конструктивным исполнением оборудования, параметрами его работы, а также результатами предшествующих освидетельствований.

В целях обеспечения внедрения предложенной технологии разработан, апробирован и внедрен в промыш-

ленную эксплуатацию комплекс нормативно-методических и инструментальных средств (измерительная техника, технические устройства, аппаратно-программные комплексы) для обеспечения безопасной эксплуатации динамически нагруженного оборудования ОПО. В частности, разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее предлагаемые подходы в области оценки технического состояния и обеспечения безопасной эксплуатации объектов, эксплуатируемых при динамических воздействиях. Программное обеспечение представлено в виде семи независимых программных комплексов (MStruct, SIdent, Stand, Норма, Correlation, CPipes, Compass), применяемых на различных этапах внедрения предложенной технологии (рис. 2). На программные продукты MStruct, Stand получены свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Ключевое место в рассматриваемом комплексе программ отведено программному пакету MStruct, предназначенному для выполнения структурного мониторинга технологического оборудования, а также зданий и сооружений на ОПО. В программе MStruct реализована концепция, основанная на применении метода конечных элементов [3, 4]. Архитектура системы MStruct построена следующим образом. Имеется препроцессор, в который загружается подготовленная ранее расчетная схема объекта мониторинга. Данная схема может быть построена в любой программе конечно-элементного анализа, например с использованием программ COMPASS, Ansys, Nastran и др.

Основной функцией препроцессора программы MStruct является задание исходных данных для осуществления мониторинга. Это процедура включает:

- присоединение через SQL сервер к базе данных мониторинга, формируемой центральным контроллером системы;
- конфигурирование каналов системы;
- привязка каналов к конкретным точкам загруженной расчетной схемы объекта;
- задание режимов мониторинга.

Помимо препроцессора в системе MStruct имеется также постпроцессор, совмещенный с процессором.

Основная задача процессора — вычислительные операции с загруженными в оперативную память матрицами, характеризующими конструктивное исполнение объекта, а также выполнение расчетов напряженно-деформированного состояния с периодичностью, определенной на этапе препроцессинга.

Постпроцессор отвечает за отображение в реаль-

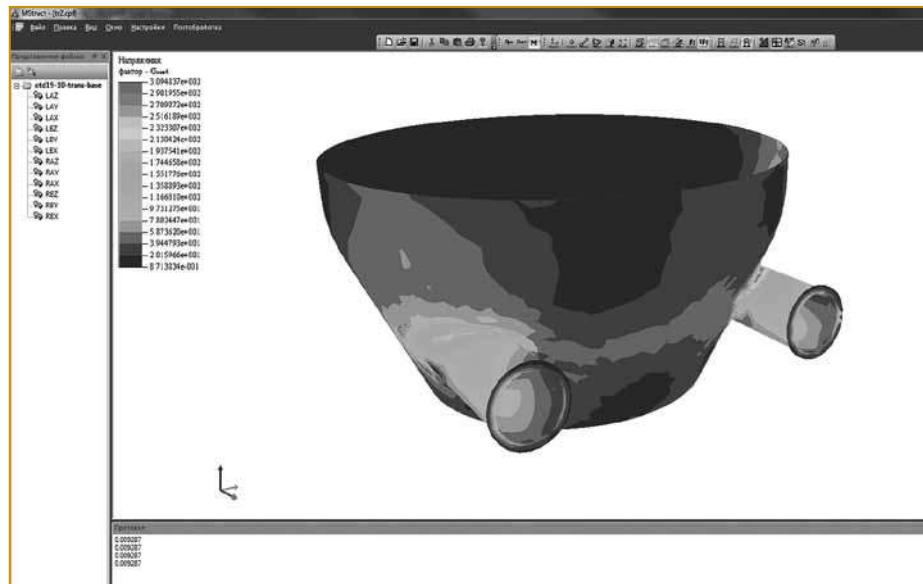


Рис. 3. Пример отображения результатов мониторинга объекта в ПО MStruct

ном режиме времени текущего состояния объекта (рис. 3) по выбранным пользователем позициям (отображение деформаций, усилий, напряжений, запасов прочности и т.д.), а также документирования (протоколирования) процесса мониторинга по историческим данным.

Вопросы управления динамическим состоянием динамически нагруженного оборудования в рамках внедрения технологии (рис. 1) решаются с использованием программной системы COMPASS [6, 7]. Данная программная система (разработчики — Безделев В. В., Лукьянов А. А., Буклемишев А. В., Трутаев С. Ю. и др.) предназначена для оптимального проектирования машиностроительных и строительных конструкций и в контексте рассматриваемой технологии используется для:

- прочностного и ресурсного анализа технологического оборудования ОПО с применением собственной иерархии изопараметрических объемных конечных элементов с различной степенью аппроксимации границ [4];
- полноценного динамического анализа механических колебательных систем при действии вибрационных, сейсмических и др. видов динамических нагрузок, в том числе на основе разложения движения системы по формам свободных колебаний, а также с применением процедур прямого интегрирования уравнений движения [5];
- идентификации напряженно-деформированного состояния механических систем с конечным числом степеней свободы по экспериментальным данным [8];
- анализа динамики механических систем с демпфированием, в том числе в режиме оптимизации уровня демпфирования и определения координат размещения дискретных демпферов вязкого и сухого трения [9].

**Выводы**

Рассмотрена технология оценки технического состояния промышленного оборудования опасных производственных объектов, эксплуатируемого при динамических воздействиях техногенной и естественной природы. Технология ориентирована на применение в отношении технологического оборудования ОПО I и II класса опасности и предполагает использование различных по своему составу стратегий контроля состояния оборудования во время эксплуатации, а также объемов внедрения средств повышения динамической стойкости в зависимости от группы критичности оборудования по фактору динамического нагружения. Представленная технология прошла апробацию применительно к технологическому оборудованию таких промышленных отраслей, как нефтепереработка, химия и нефтехимия, нефте- и газодобыча, и легла в основу отраслевых нормативно-методических документов РД 0154-13, СТО-00220227-044, а также национального стандарта ГОСТ Р 555431. Для обеспечения применения технологии разработано специализированное ПО, представленное семью независимыми программными комплексами, применяемыми на различных этапах ее внедрения. На часть программных продуктов получены свидетельства об официальной регистрации программы на ЭВМ.

**Список литературы**

1. Трутаев С. Ю. Создание нормативной базы для увеличения межремонтного пробега технологических установок

- предприятий химического и нефтегазового комплекса // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 10. С. 37-41.
2. Трутаев С. Ю. и др. Применение многоканальной вибродиагностической аппаратуры для технической диагностики компрессорного оборудования на основе синхронной регистрации параметров вибрационных и газодинамических процессов // Контроль. Диагностика. 2005. №11. С.24 - 27.
  3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике М.: Мир. 1975. 542 с.
  4. Трутаева В. В., Трутаев С. Ю. Разработка иерархии конечных элементов с переменным числом узлов на ребрах для исследования напряженно-деформированного состояния объектов машиностроения // Системы. Методы. Технологии. Братск: БрГУ. 2014. №3(23). С.90 - 94.
  5. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат. 1982. 448 с.
  6. Безделев В. В., Буклемишев А. В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя. Иркутск: ИрГТУ. 2000. 120 с.
  7. Трутаев С. Ю. и др. Применение программной системы COMPASS для расчета машиностроительных деталей и конструкций // Тр. III междунар. конф. «Проблемы механики современных машин». Улан-Удэ. 2006. Т.3. С.82 - 86.
  8. Trutaev S.Y. Method for stress-strain-state evaluation of production equipment and buildings and structures of industrial entities // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49. № 11-12. P. 816-819.
  9. Трутаев С. Ю. Управление динамическим состоянием промышленного оборудования на основе разработки и внедрения эффективных средств виброзащиты // Системы. Методы. Технологии. Братск: Братский государственный университет. 2016. №3(31). С. 81 - 84.

*Трутаев Станислав Юрьевич — канд. техн. наук, заведующий отделом инновационных разработок АО «ИркутскНИИХиммаш». Контактный телефон (3952) 410-336. E-mail: stas@himmash.irk.ru*

**eWON Flexu соединяет станочное оборудование с интернетом через сеть 4G**

Компания HMS Industrial Networks объявила о выпуске новой карты расширения 4G LTE EU (Европа) для своего усовершенствованного IIoT-шлюза и маршрутизатора удаленного доступа eWON Flexu. Она предоставляет пользователям Flexu удаленный доступ к управлению и контролю станочного оборудования через сотовую сеть 4G.

Множество приложений полевого уровня не имеет проводного соединения с Internet и требует соединения через сотовые сети. С помощью eWON Flexu с картой расширения 4G пользователи получают удаленный доступ к станочному оборудованию в местах, где Ethernet недоступен.

4G обеспечивает многочисленные преимущества.

— Более надежное соединение. Карта расширения 4G обеспечивает соединение не только через новейшие сети LTE (Long-Term Evolution — долговременное развитие), но также автоматически переходит на сети предыдущих поколений. Если сеть 4G нестабильна, перегружена или недоступна, то соединение автоматически переключается на 3G (HSPA/WCDMA) или 2G (GPRS/EDGE). Другими

словами, бесперебойная связь поддерживается в любых обстоятельствах.

— Более быстрый обмен данными. Карта 4G также выигрывает за счет меньших задержек, обеспечиваемых ее совместимостью с новейшим оборудованием, устанавливаемым операторами мобильных сетей. Она также обеспечивает лучшее сетевое покрытие в зависимости от установки передвижных базовых станций мобильными операторами. Новая карта 4G перекрывает все необходимые диапазоны частот (В1, В3, В7, В8, В20), гарантируя совместимость с основными мобильными операторами Европы, Ближнего Востока и Африки.

SIM карта с тарифом для мобильного Internet — это все, что нужно для соединения Flexu с облачным сервисом Talk2M и удаленного доступа к промышленной системе управления. Аналогичным образом приложения SCADA с удаленным доступом через VPN также выигрывают за счет использования SIM карты вместо предоставления фиксированного IP адреса оборудованию на удаленном объекте.

[Http://www.industrialnets.ru](http://www.industrialnets.ru), [www.ewon.biz](http://www.ewon.biz) и [www.anybus.com](http://www.anybus.com)