

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВС И ИХ КОМПОНЕНТЫ

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

В июне этого года в Бергене (Норвегия) состоялся 26-й Конгресс CIMAC. На нем было представлено более трехсот докладов, посвященных различным аспектам теории, проектирования, исследования и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. В числе прочих обсуждались проблемы автоматизации двигателей с применением систем электронного управления. Это направление приобретает все большую актуальность, в первую очередь, в связи с расширяющимся применением систем типа common rail.

НЕПРЕРЫВНЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТАВА ТОПЛИВА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДИЗЕЛЯ

Patrice Flot, Controle Mesure Regulation, Франция, Alain Meslati, Controle Mesure Regulation, Франция, Thierry Delorme, Ecole Centrale Marseille, Франция

Использование современной электроники открывает новые возможности гибкого регулирования таких параметров, как давление и температура воздушного заряда, охлаждающей жидкости, масла и топлива, однако качество топлива в число таких параметров до сих пор не входило, поэтому оптимизация рабочего процесса в настоящее время выполняется исходя из некоего усредненного состава топлива, имеющегося на рынке. Следовательно, существенное отклонение фактического состава топлива от расчетного может приводить к заметному изменению показателей двигателя.

Требования к топливной экономичности двигателей и их экологическим характеристикам непрерывно возрастают.

Одна из причин поиска альтернативных источников энергии состоит в замедлении темпов дальнейшего совершенствования дизельных двигателей. Так, для снижения расхода топлива на 5 % потребовалось около 10 лет. Очевидно, что в будущем на это потребуются еще больше времени, поскольку КПД современных двигателей приближается к КПД цикла Карно.

В настоящее время для снижения расхода топлива и вредных выбросов чаще всего используются такие технологии и средства, как:

- система впрыска common rail;
- профилирование кривой впрыска;
- многотопливный впрыск;
- процесс Миллера;
- регулируемые фазы газораспределения;

- регулируемая степень сжатия;
- 2-ступенчатый турбонаддув;
- регулируемый турбокомпрессор;
- использование водотопливной эмульсии;
- увлажнение воздушного заряда;
- рециркуляция отработавших газов.

Кроме того, пользователи стараются снизить расход топлива и количество вредных выбросов за счет эксплуатационно-технических мероприятий, касающихся как собственно двигателя, так и силовой установки в целом.

Внедрение на крупных машинах систем впрыска типа common rail приводит к необходимости использования для управления двигателем большего числа параметров, что, в свою очередь, требует создания новых датчиков, однако состав топлива составляет исключение. В частности, отсутствует непрерывный контроль параметров, определяющих задержку самовоспламенения, а именно цетанового числа (для дизельного топлива) и расчетного углеродного индекса ароматичности ССАІ (для тяжелых топлив), при том что указанные параметры существенно влияют на оптимальный угол опережения впрыска, давление в цилиндре, и, в конечном счете, на КПД двигателя.

Согласно нашему прогнозу, новое поколение систем очистки ОГ будет включать в себя непрерывный мониторинг состава топлива, в частности содержания в нем серы.

Состав топлива сказывается не только на экономичности и уровне вредных выбросов, но и на надежности работы установки. Требования Международной ассоциации классификационных обществ (IACS) обязывают судовладельцев хранить пробы топлива из каждой заправки с тем, чтобы впоследствии их можно было предъявить в случае возникновения каких-либо проблем.

Несмотря на эти меры предосторожности, многие операторы сталкиваются со случаями серьезных повреждений двигателей в результате использования некачественного топлива.

В то же время стационарное оборудование для непрерывного анализа топлива существует и успешно работает. Подобное оборудование используется для контроля состава исходных и конечных продуктов нефтеперерабатывающих заводов. С конца 1990-х годов для этой цели применяется измерительная аппаратура, работающая в ближней

инфракрасной области (near infra red technology — NIR).

Однако стационарные аппараты, которые весят около тонны и стоимость которых приближается к миллиону Евро, для условий эксплуатации непригодны.

Используя указанную технологию и накопленный опыт, авторы решили создать миниатюрный NIR-анализатор для дизелей мощностью свыше 500 кВт.

Зависимость между расходом топлива и его составом

Цетановое число зависит от состава топлива и в наибольшей степени влияет на длительность периода задержки самовоспламенения. Чем ниже цетановое число, тем больше период задержки самовоспламенения, что ведет к увеличению давления сгорания (рис. 1).

Поскольку двигатель проектируется на определенную величину давления сгорания, его параметры рассчитываются для самого тяжелого варианта, т. е. нижнего предела цетанового числа, а именно: 40 — для дизельного топлива DA и 35 — для дизельного топлива DB (согласно обозначениям CIMAC).

Фактически, особенно на флоте, нередко встречается топливо с более высоким цетановым числом, однако, чтобы извлечь из этого какую-то выгоду, оператор должен выполнить достаточно трудоемкий анализ и произвести соответствующую подстройку двигателя.

Связь между расходом топлива и периодом его самовоспламенения давно и основательно изучена и впервые была впервые опубликована в SAE Transaction в 1937 г.

Из этой публикации следует, что при оптимальном значении цетанового числа экономия топлива достигает 8 %.

Что касается тяжелых топлив, то здесь потенциал экономии даже больше, поскольку их свой-

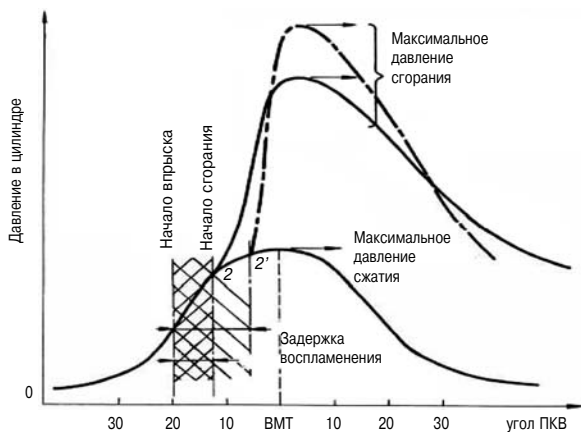


Рис. 1. Динамика изменения давления в цилиндре в зависимости от периода задержки самовоспламенения

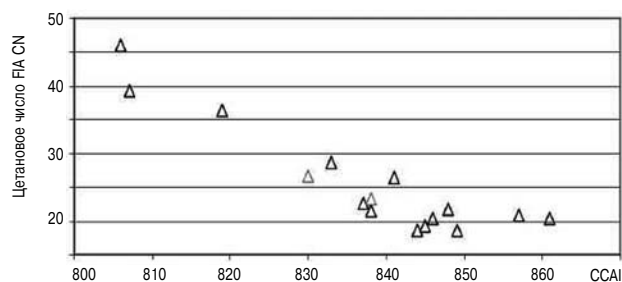


Рис. 2. Зависимость цетанового числа от CCAI (построена с помощью анализатора сгорания)

ства, определяющие воспламеняемость, включая цетановое число, стандартами ИСО не регламентируются, поэтому поставщики не заботятся о них вовсе. С целью защиты двигателей их изготовители, как правило, задают допуски на величину расчетного углеродного индекса ароматичности (Calculated Carbon Aromaticity Index — CCAI) — параметра, введенного в 1980-х годах фирмой Shell и основанного на плотности и вязкости топлива. Однако CCAI не всегда позволяет точно предсказать период задержки самовоспламенения, особенно если топливо имеет низкую вязкость или высокую плотность.

Поэтому для тяжелых топлив все более актуальным становится использование новых параметров.

На рис. 2 показана зависимость FIA-CN от CCAI по данным одного французского оператора, испытывавшего проблемы с двигателями при низких (порядка 20) значениях FIA-CN топлива. Очевидно, что эти новые параметры не только важны для безопасности, но и позволяют вести плавную настройку процесса сгорания в онлайн-режиме при условии их непрерывного измерения.

Столь же сильно зависит от состава топлива и КПД газового двигателя. Производитель двигателя, как правило, оговаривает метановое число природного или остаточного газа, на котором двигатель будет работать. Датчик состава топлива непрерывного действия послужит хорошим дополнением к датчику детонации там, где возможны значительные колебания состава газа в процессе эксплуатации.

Зависимость между уровнем вредных выбросов и составом топлива

Заводские настройки двигателя, определяющие выбросы CO₂, NO_x, CO, HC и PM, должны обеспечить определенный «запас прочности» с учетом возможных колебаний состава топлива, применяемого в эксплуатации.

Для этого важно установить зависимость уровня вредных выбросов от состава топлива.

На рис. 3 показаны примеры таких зависимостей для четырехтактного автомобильного дизеля с номинальной частотой вращения

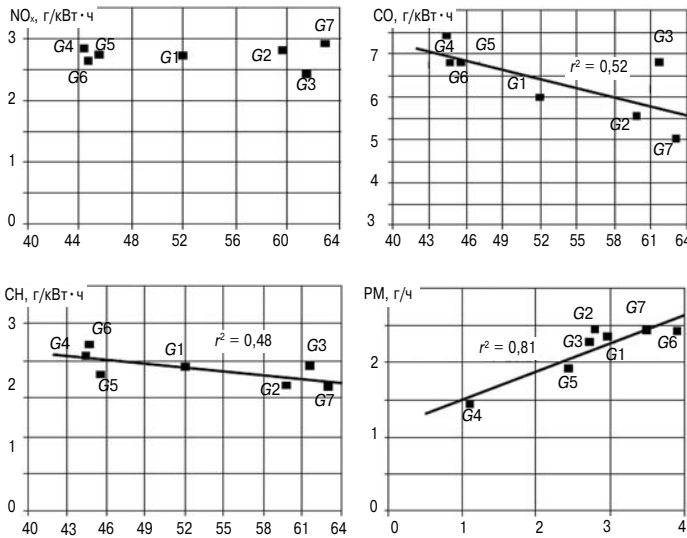


Рис. 3. Зависимость выбросов NO_x, CO, CH и частиц от цетанового числа и вязкости топлива

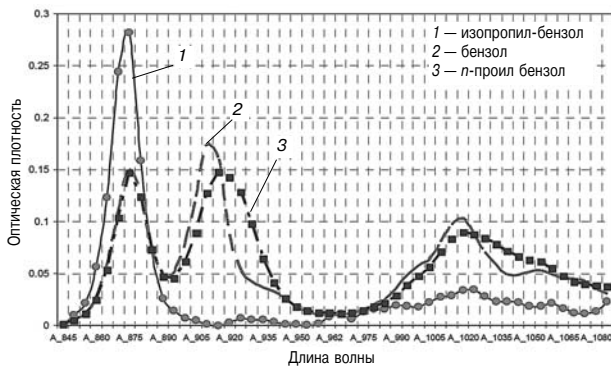


Рис. 4. NIR-спектр для трех различных углеводородов в диапазоне от 845 до 1100 нм

4000 об/мин. Двигатель испытывался при работе на 7 различных сортах дизельного топлива. За исключением NO_x, выбросы других вредных веществ, (например, CO и HC) сильно зависят от цетанового числа и их изменение может достигать 20 %, поскольку именно цетановое число определяет закон сгорания и тепловыделения. В то же время выбросы частиц зависят, в основном, от вязкости топлива.

Непрерывное измерение состава топлива в эксплуатации и использование электронных средств управления двигателем позволят снизить уровень вредных выбросов при использовании низкокачественного топлива, и предотвратить детонацию в случае превышения заданных предельных значений.

Принцип действия

Датчик состава топлива (Fuel Quality Sensor — FQS) состоит из аппаратного и программного модулей.

Основным элементом прибора является оптический датчик, работающий в ближней инфракрасной области (NIR).

NIR-спектроскопия — метод исследования, основанный на поглощении инфракрасного электромагнитного излучения в диапазоне длины волны от 780 до 2500 нм.

В этой области молекулярные связи, такие как C-C, C-H, C-O и O-H, под воздействием света начинают вибрировать и деформироваться. Спектр возникающего при этом излучения несет информацию о молекулярном составе топлива. Он представляет собой сложное сочетание комбинационных и обертоновых полос. Такой спектр носит название NIR-спектра.

Для анализа NIR-спектра было необходимо создать принципиально новый миниатюрный спектрометр, пригодный для применения на дизеле, т. е. достаточно прочный, надежный и дешевый. Этим требованиям удовлетворяет спектрометр, который соответствует длине волны от 800 до 1000 нм. В этой области спектра можно использовать обыкновенные кремниевые детекторы и светодиоды.

Как видно из рис. 4, можно четко разделить ароматические и алифатические функции углеводородных составляющих топлива.

На рис. 5 показан миниатюрный датчик последнего поколения, используемый для анализа дизельного топлива, а также тяжелых и легких топлив. Чувствительные элементы датчиков NIR состоят из частотных фильтров и КМОП-структур, вырабатывающих электронный сигнал.

Путь светового луча от источника NIR показан на рис. 6. Луч проходит через светоделитель, при этом часть света попадает на верхнюю часть приемника NIR и образует эталон для сравнения, а другая часть света проходит через окно и да-

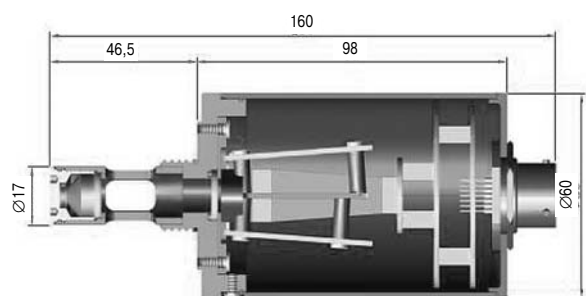


Рис. 5. NIR-спектрометр

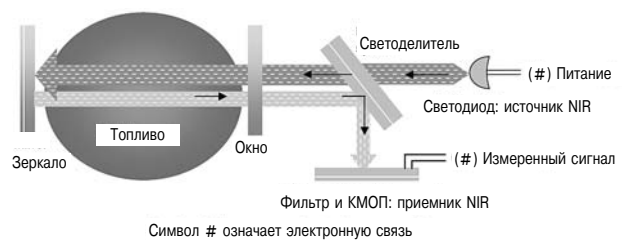


Рис. 6. Оптическая схема датчика

лее, пройдя через поток топлива, попадает на зеркало. Этот свет, отраженный от зеркала, возвращается на светодетектор, откуда попадает на нижний приемник NIR, формируя таким образом измеряемый сигнал.

Размещение датчика на двигателе

Оптимальным местом для установки датчика на двигателе является линия топливоподачи на участке низкого давления (рис. 7). Его можно установить, например, на сгибе топливной трубки, на корпусе фильтра или топливного насоса низкого давления. Датчик соединен с блоком управления двигателем ECU через шину CAN BUS.

Питание датчика производится от источника напряжением 24 В, а его потребление не превышает 5 Вт.

Основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться при установке датчиков на двигателе:

- постоянно действующее на чувствительный элемент датчика давление в 10 бар, которое в переходных процессах может возрастать десятикратно;
- уровень вибрации, достигающий 10 g при частоте от 1 до 2000 Гц;
- воздействие высокой температуры (до 160 °С в случае тяжелого топлива);
- необходимость самоочищающейся оптики в случае тяжелого топлива;
- работа электронных схем при температуре до 105 °С.

При этом ресурс датчика должен быть не менее 48 000 ч.

К настоящему времени изготовлено несколько опытных образцов датчиков состава дизельного топлива, поставленных на лабораторные (без двигателя) испытания. Целью испытаний является проверка способности датчиков к работе непосредственно на двигателе.

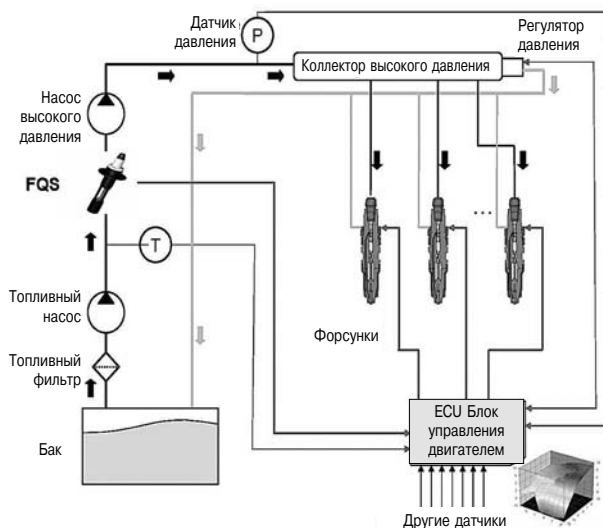


Рис. 7. Система common rail с датчиком состава топлива FQS

Требования к испытаниям формулируются в соответствии с правилами IACS.

Поскольку процессы впрыска и сгорания во многом зависят от особенностей химического состава топлива, целесообразно организовать непрерывный контроль его свойств, а именно — числа и веса различных химических связей его составляющих. Подобный мониторинг получил название углеводородного профилирования (Hydro Carbon Profiling — HCP). Этот метод был запатентован.

Конечной целью использования датчика является возможность непрерывной оптимизации процесса сгорания в соответствии с текущим составом топлива, что обеспечивает снижение расхода топлива и вредных выбросов, а также повышает эксплуатационную надежность.

Проектант двигателя может воспользоваться либо значениями HCP, либо классическими физико-химическими параметрами, которые измеряются датчиком и передаются по линии CAN BUS.

Сигнал по шине CAN BUS поступает в блок управления двигателем ECU. Таким образом в систему вводится дополнительный параметр управления исполнительными устройствами автоматики дизеля по заданному закону. Закон управления зависит от типа двигателя, и должен быть сформирован по результатам его испытаний. Проектанты двигателя, возможно, предпочтут воспользоваться физическими и химическими параметрами, если им заранее известны связи между этими параметрами и поведением двигателя.

Аналогичные датчики для тяжелого топлива будут доступны в 2011 г. Они отличаются встроенным устройством самоочистки и большей термостойкостью.

Одновременно развернуты работы по созданию подобных датчиков для природного и остаточного газа.

Но уже сегодня, не задаваясь пока целью включить датчики состава топлива в систему управления, их можно использовать в качестве измерительных устройств для контроля следующих параметров:

- плотность;
- вязкость;
- содержание воды в топливе;
- содержание серы;
- цетановое число;
- температура дистилляции;
- температура воспламенения;
- температура застывания;
- теплотворная способность.

Непрерывный контроль указанных параметров через показания датчика, легко считываемые с

использованием протокола CAN BUS, позволяют сравнивать их с соответствующими паспортными параметрами используемого топлива, с их предельными значениями, оговариваемыми производителем двигателя, со спецификациями для данного класса топлива или с рекомендациями CIMAC.

Слепой тест

Квалификационные испытания датчика, проводимые на заводе или на месте установки, всегда начинаются с так называемого «слепого теста». Он заключается в том, что несколько проб различных топлив проверяются с помощью датчика, после чего результаты сравниваются с результатами классических лабораторных анализов. Во время теста результаты лабораторных анализов неизвестны, что исключает возможность специальной подстройки датчика и его ПО.

В период с 2006 по 2009 г. для производителей двигателей и конечных пользователей были проведены «слепые тесты» более 300 видов топлива, и во всех случаях результаты сравнения с данными обычных анализов оказались вполне удовлетворительными.

Выводы

Оптические датчики, работающие в ближней инфракрасной области, открывают путь для создания новых поколений «интеллектуальных» двигателей, работа которых совершенно не зависит от состава топлива в баке.

Первый малобюджетный NIR-датчик состава топлива основан на химическом методе измерения (НСР), представляющем собой универсальный способ определения молекулярной структуры топлива.

Использование NIR-датчика в сочетании с методом НСР позволяет менее чем за секунду получить разнообразную и подробную информацию, включая данные, влияющие на задержку самовоспламенения, а также фактические значения опережения впрыска и (или) соотношения воздух–топливо. Эта информация может быть использована для оптимизации управления процессами сгорания и очистки ОГ. Выходной сигнал датчика поступает в блок управления через стандартный интерфейс CAN BUS, что создает возможность непрерывной оптимизации режима двигателя в реальном времени.

МУЛЬТИМОДЕЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАСЛОНКИ В БАЙПАСЕ ТУРБОКОМПРЕССОРА КРУПНОГО СРЕДНЕБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Fredrik Oestman, Wartsila Finland Oy
Tom Kaas, Wartsila Finland Oy, Финляндия*

Динамические свойства судовых и стационарных дизелей зависят от множества факторов, в

частности, от режима работы двигателя и от внешних условий. Кроме того, на них влияют износ механических компонентов и засорение проходных сечений различных трактов. Поэтому параметры элементов системы постоянно меняются, и их сочетание практически никогда не бывает оптимальным с точки зрения работы двигателя. Оптимизация режима работы двигателя при этом обычно достигается методом параметрической компенсации, суть которого состоит в том, что параметры регулирования становятся функциями измеряемой величины, например, нагрузки двигателя. Альтернативным методом является адаптивное регулирование, преимущество которого состоит в отсутствие дополнительных измерений. Проблемой адаптивных систем является дрейф параметров при недостаточном уровне возмущающих воздействий.

В качестве решения данной проблемы предлагается мультимодельная система адаптивного регулирования наддува двигателя внутреннего сгорания. Система адаптивного регулирования была испытана на газовом двигателе Wartsila 6L34SG мощностью 2,7 МВт. При этом определялись динамические воздействия со стороны заслонки регулирования наддува и турбокомпрессора, которые использовались для формирования оптимальной динамической реакции регулятора.

В данном случае упомянутый метод реализуется с помощью мультимодельной системы адаптивного регулирования (англ. MMAC — multi-model adaptive control). В такой системе регулируемый объект моделируется с помощью некоторого конечного числа одновременно обновляемых дискретных моделей. Каждая модель ассоциируется с оптимальным регулятором, параметры которого определяются отдельно (в разомкнутом контуре). При этом результирующий выходной сигнал регулятора вычисляется как взвешенная сумма всех его выходных сигналов, причем весовые коэффициенты определяются по ошибкам модели (He, Kaufman, Roy, 1986).

Наиболее подходящая модель выбирается методом контроля ошибок модели. Тем самым предотвращается распространение ошибок округления, а также устраняется необходимость применения достаточно сложных методов оценки параметров, таких как, например, рекурсивный метод наименьших квадратов или фильтр Калмана. Возможность выбора нужного регулятора позволяет не только создавать любые структуры, но и оценивать устойчивость замкнутой системы регулирования без реального замыкания контура.

Постановка задачи

Система адаптивного регулирования предназначена для поддержания заданного давления

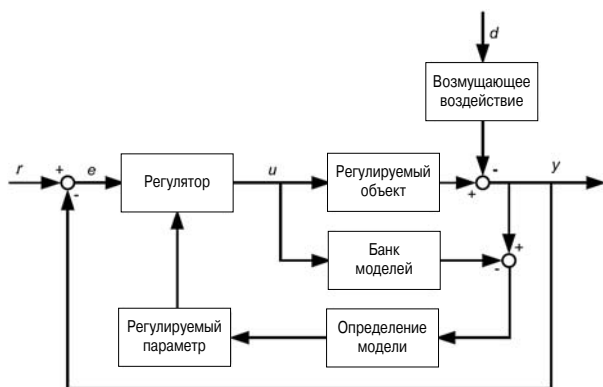


Рис. 1. Блок-схема замкнутой системы

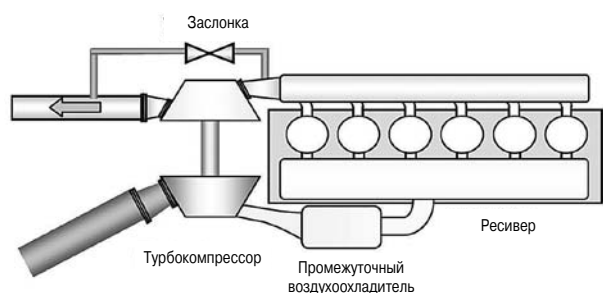


Рис. 2. Схема газоздушного тракта двигателя

наддува в двигателе с помощью поворотной заслонки перепуска. Для коррекции поведения регулятора в соответствии с изменениями динамических характеристик объекта была разработана мультимодельная схема регулирования. На рис. 1 показана блок-схема типичной замкнутой системы ММАС, где r — это уставка, e — ошибка регулирования, u — регулирующий сигнал, d — возмущение и y — измеряемая (регулируемая) величина.

В двигателях с искровым зажиганием уровень вредных выбросов зависит от соотношения воздух—топливо. Понятно, насколько важно при этом обеспечить нужную величину расхода поступающего в цилиндры воздуха при меняющихся условиях. В двигателях с наддувом регулирование расхода воздуха обычно осуществляется с помощью заслонки перепуска отработавших газов, установленной в байпасе турбины. При открытии заслонки расход газов через турбину уменьшается. При этом вращение ротора турбокомпрессора замедляется, соответственно падает давление в воздушном ресивере. Таким образом, с помощью перепускной заслонки можно регулировать давление наддува. Схема газоздушного тракта показана на рис. 2.

В качестве дросселя в байпасе отработавших газов чаще всего используется поворотная заслонка (рис. 3), имеющая существенную нелинейность рабочей характеристики, т. е. зависимости между



Рис. 3. Поворотная заслонка двигателя Wartsila 6L34SG

расходом среды через заслонку и углом ее поворота.

Задача регулирования еще более усложняется наличием в системе других нелинейностей, таких как, например, трение покоя и чистое запаздывание, свойственные гидравлическим и пневматическим исполнительным устройствам. Все это существенно усложняет систему и снижает эффективность регулирования.

Фактически все динамические характеристики заслонки и турбокомпрессора зависят, в основном, от текущего режима работы двигателя, т. е. его скорости и (или) нагрузки. Нейтрализация влияния нелинейностей и обеспечение приемлемых характеристик регулирования обычно достигается за счет коррекции коэффициентов усиления динамических звеньев. Такая коррекция может осуществляться по некоторым дополнительным параметрам, которые измеряются и вводятся в систему. Одним из наиболее часто используемых параметров такого рода является нагрузка. Измерить нагрузку дизель-генератора достаточно просто. В механических агрегатах, например дизель-компрессорах, измерение нагрузки с необходимой точностью представляет значительно более сложную задачу.

Этих сложностей можно избежать, если отказаться от измерения дополнительных параметров для коррекции регулирующего воздействия, используя вместо этого динамические характеристики системы. Именно этот подход на основании метода ММАС был применен для регулирования заслонки в нашем случае.

Мультимодельный адаптивный PID регулятор

Суть мультимодельного метода состоит в формировании набора («банка») моделей, в котором каждая модель соответствует определенной области динамических характеристик объекта. Точное представление непрерывного нелинейного объекта обычно требует достаточно большого ряда линейных моделей. Однако для коррекции работы регулятора чаще всего бывает достаточно упрощенного описания объекта, что позволяет

существенно сократить число моделей. Это особенно важно для бортовых систем управления в силу присущих им ограничений вычислительной мощности и памяти.

Метод ММАС дает возможность использовать произвольно выбранные структуры моделей для описания непрерывной системы. В трудах ряда авторов (например, Boling, Seborg, Hespanha, 2007; Boling, Gustafsson, Haggblom, 2008) показано, что динамическая система с существенными нелинейностями может быть описана системой уравнений первого порядка с чистым запаздыванием. В нашем случае для описания соотношения между углом поворота заслонки и давлением воздуха в ресивере использованы уравнения первого порядка в форме Лапласа:

$$H_i(s) = \frac{\hat{y}_i(s)}{u(s)} = \frac{k_i}{\tau_i s + 1} \cdot e^{-Ls}, \quad (1)$$

где \hat{y} — расчетное давление в ресивере; u — выходной сигнал регулятора; k — коэффициент усиления контура; τ — постоянная времени; L — чистое запаздывание; s — переменная преобразования Лапласа; i — индекс модели.

Тогда погрешность оценки e модели может быть рассчитана по формуле

$$e_i = y - \hat{y}, \quad (2)$$

где y — измеряемая (регулируемая) величина.

На рис. 4 показана структура разработанного ММАС-регулятора. Каждая модель ассоциируется с некоторыми параметрами регулятора, определяющими оптимальные для данной модели показатели его работы. Система выбирает наилучшую на данный момент модель по признаку минимальной погрешности оценки e_i , при этом в действие вступает регулятор, описываемый данной моделью. Для системы управления заслонкой была выбрана структура PID-регулятора, передаточная функция которой выражается уравнением

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (3)$$

где K_p — коэффициент усиления регулятора; K_I — коэффициент усиления интегрального канала; K_D — коэффициент усиления дифференциального канала.

Здесь, в отличие от других известных систем ММАС, вместо нескольких регуляторов использован всего один, но с переменными параметрами. Видимый недостаток такого подхода состоит в том, что переключение параметров может, вообще говоря, вызывать переходные процессы в системе. Практически данный эффект на показатели работы не влияет, так как сглаживается за счет большой постоянной времени системы. Для того чтобы сделать выбранную на данный мо-

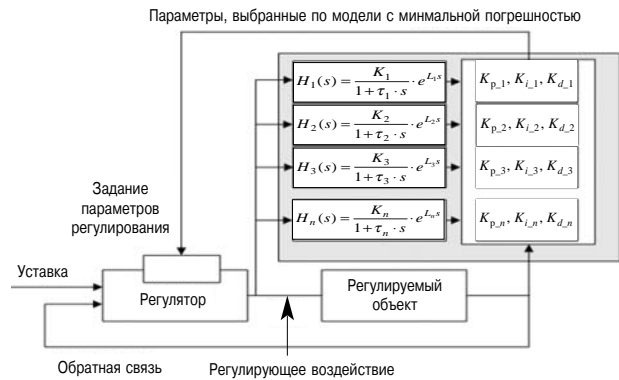


Рис. 4. Структура ММАС регулятора

мент модель еще более робастной, в нее вводится гистерезис по погрешности модели, пропускаемой через фильтр нижних частот.

Результаты экспериментов

Для практической проверки эффективности алгоритма регулирования ММАС были проведены полномасштабные натурные испытания системы на лабораторном мотор-генераторном стенде в г. Вааса, Финляндия, укомплектованном шестицилиндровым газовым двигателем Wartsila 6L34SG мощностью 2,7 МВт. Система регулировала давление воздуха в ресивере с помощью поворотной заслонки с пневмоприводом. Регулирующее воздействие осуществлялось с интервалом в 10 мс, а выбор модели — с интервалом в 1 с. Двигатель работал по нагрузочной характеристике при постоянной частоте вращения 750 об/мин.

Чтобы охватить весь динамический диапазон регулирования, было использовано пять моделей, каждая из которых описывала определенный участок диапазона. Значения параметров каждой модели определялись экспериментально при нагрузке двигателя 10, 30, 50, 70 и 100%, при этом для каждой модели определялась совокупность параметров PID-регулятора.

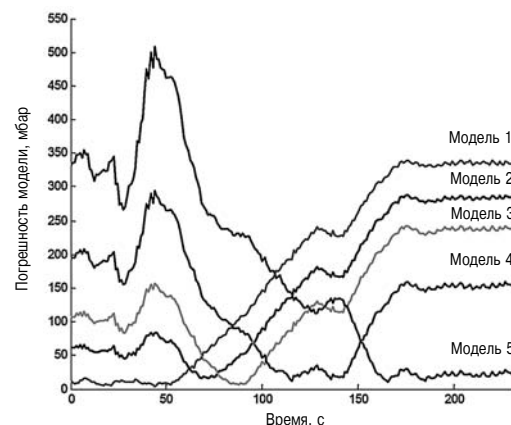


Рис. 5. Изменение погрешности моделей во времени при увеличении нагрузки от 0 до 100 %

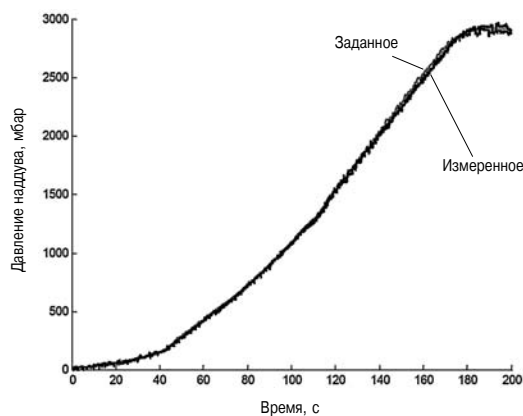


Рис. 6. Изменение погрешности моделей во времени при увеличении нагрузки от 0 до 100 %

На рис. 5 показана зависимость погрешности модели от времени при постепенном увеличении нагрузки от 0 до 100 %. Процесс увеличения нагрузки начинается на 25 и заканчивается на 180 с. Эксперимент подтвердил последовательный выбор оптимальных моделей по мере роста нагрузки.

При этом, несмотря на использование весьма ограниченного числа моделей первого порядка, погрешность их по выходу не превышает 30 мбар.

На рис. 6 показаны значения заданного и фактического давления наддува, из которого видно, что, несмотря на изменение динамических параметров объекта, регулятор способен обеспечить заданный график изменения уставки.

Выводы

В докладе представлена система адаптивного управления перепускной заслонкой турбокомпрессора крупного среднеоборотного двигателя. Эта система работает по принципу ММАС, согласно которому объект представлен конечным набором моделей. Разработанный метод регулирования был успешно опробован при натурных испытаниях на среднеоборотном газовом двигателе Wartsila 6L34SG. Испытания подтвердили, что данный метод способен оптимизировать параметры регулятора в зависимости от изменяющихся динамических характеристик объекта без использования дополнительных измерений.

ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Dirk Eikemeier, MAN Diesel & Turbo SE, Германия,
Thomas Dauenhauer, MAN Diesel & Turbo SE, Германия*

Надежность современных дизелей и газовых двигателей все в большей степени зависит от надежности работы обслуживающей их электроники. В качестве примера можно назвать систему впрыска типа «common rail», являющуюся одним из основных средств обеспечения соответствия

уровня выбросов действующим и перспективным нормативам.

Новое семейство электронных систем дизельной автоматики для четырехтактных двигателей MAN Diesel типа SE получило название SaCoSone (Safety and Control System on engine). В него входит ряд электронных модулей, устанавливаемых непосредственно на дизеле или газовом двигателе.

Модуль управления СМ, помимо регулирования скорости и управления, выполняет также функции аварийно-предупредительной сигнализации и защиты.

Модуль впрыска IM может быть использован самостоятельно в качестве блока управления системой Common Rail. Два таких модуля могут устанавливаться параллельно — в тех случаях, когда требуется особая надежность (например, в однодвигательной судовой установке). При этом один из двух модулей используется в качестве резервного.

Кроме того, в состав системы могут входить: интерфейсный модуль GM, используемый для связи с общесудовыми системами (например, с судовой системой аварийно-предупредительной сигнализации) и дисплейный модуль DM, устанавливаемый на двигателе и используемый для связи с местным или дистанционным пультом управления.

Все модули SaCoSone соединены между собой через дублированную шину CAN BUS, с использованием расширений протокола, поддерживающих функции мониторинга и резервирования.

Система управления

В соответствии с принципом нисходящей разработки проектирование началось с создания общей концепции системы. В качестве первоочередной задачи при этом ставилось создания надежной системы, способной обеспечить работу двигателя при возникновении любого из прогнозируемых единичных отказов и удовлетворяющую требованиям всех основных классификационных обществ. Следуя принципам системного подхода, был проведен подробный анализ характера и последствий отказов (FMEA).

По результатам данного анализа первоначальная структура системы была откорректирована. Например, почти для всех точек измерения температуры было введено дублирование датчиков (точнее, были предусмотрены два независимых чувствительных элемента в одном корпусе). Каждый чувствительный элемент был подключен к двум независимым модулям управления (например, к модулям системы аварийно-предупредительной сигнализации и системы защиты). При исчезновении сигнала одного из

чувствительных элементов, например, на входе модуля АПС (аварийно-предупредительной сигнализации), данный модуль через коммуникационную шину переключается на прием сигнала от модуля системы защиты.

Электронные управляющие модули выполнены на основе микросхем с высокой степенью интеграции. Поскольку для пользователя такой модуль является минимальной единицей, допускающей замену, FMEA рассматривает дефекты модулей в целом.

Электронные модули управления

Все электронные модули управления предназначены для установки на дизеле. Они проходят типовые испытания по смешанной программе, основанной на спецификации испытаний E10 МАКО (Международная ассоциация классификационных обществ), распространяющейся на типовые испытания, которая дополнена проверками на соответствие нормам ЕС и специальным требованиям отдельных классификационных обществ. В ходе типовых испытаний изделия проверяются на удар, вибрацию, температуру (окружающей среды) и электромагнитную совместимость. Но для более глубокой оценки надежности микросхем необходимо идентифицировать типичные причины отказов.

Рассмотрение полного жизненного цикла изделий микроэлектроники (рис. 1) показывает, что отказы отдельных компонентов (22 %) и износ (9 %) — далеко не единственные причины отказов модулей. Наведенные отказы (12 %) — это отказы, вызванные действиями обслуживающего персонала, например, погнутые оси механических устройств.

Как правило, примерно в 20 % возвращаемых электронных изделий никаких дефектов вообще

обнаружить не удастся, поскольку модули иногда отправляются на замену, даже если отказ произошёл где-то в другом месте.

К числу других типичных причин отказов относятся конструктивные дефекты (9 %), дефекты изготовления (15 %), дефекты системного управления (4 %) и дефекты программного обеспечения (9 %), которые в общей сложности вызывают более трети всех отказов.

Для оптимизации конструкции электронных компонентов и для оценки вероятности возможных отказов вследствие дефектных деталей и износа используются различные апробированные методы и стандарты.

Стремительный прогресс современной электроники диктует необходимость использования самых последних стандартов, основанных на новейших технических достижениях и накопленном опыте. Одним из наиболее современных и универсальных стандартов на эту тему является руководство RIAC Handbook 217Plus, выпущенное Центром анализа информации по надежности (Reliability Information Analysis Center).

Методы прогнозирования надежности, подобные изложенному в RIAC Handbook 217Plus, позволяют предсказать срок службы системы и выявить ее слабые места до постановки на ресурсно-климатические испытания. Затем проводятся ускоренные ресурсные испытания (HAL — Highly Accelerated Lifetime Test), выявляющие слабые места системы, и вычисляется ее ресурс, после чего результаты расчетов и испытаний сопоставляются между собой.

Прогнозирование надежности (RIAC-HDBK-217PLUS)

Документ RIAC Handbook of 217Plus «Модели прогнозирования надежности» является, по сути, обновленной версией военного стандарта MIL-HDBK-217F, поддержка которого в 1995 г. была прекращена. В этом документе, развивающем концепции моделирования надежности и регулярно обновляемом, излагается один из новейших методов прогнозирования надежности электрических и электромеханических элементов.

Суть метода состоит в том, что он рассматривает несколько основных видов интенсивности отказов λ_i , представляющих различные механизмы отказов при нормальных условиях эксплуатации. Эти основные виды интенсивности отказов корректируются с помощью поправочных коэффициентов, так называемых π -факторов, учитывающих условия нагружения компонентов и переменные, влияющие на надежность.

По мере увеличения сложности схемы интенсивность отказов возрастает пропорционально числу компонентов этой схемы. Например, при использовании данного метода для расчета интенсивности отказов модуля впрыска SaCoSone,

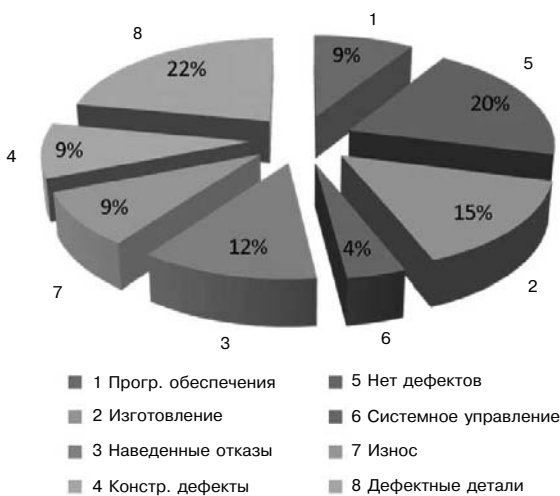


Рис. 1. Распределение причин отказов в течение жизненного цикла изделий

были получены вполне реалистичное значение, которое хорошо согласуется с опытными данными и фактической интенсивностью отказов в эксплуатации.

Ускоренные испытания

Разумеется, при прогнозировании ресурса вряд ли есть смысл испытывать партию систем в течение, допустим, десяти лет, чтобы по этим данным затем определить среднюю наработку на отказ (МТТФ). Поэтому на практике прибегают к ускоренным испытаниям, усиливая те или иные нагрузки, например, температурные.

Количественные испытания проводятся для статистической оценки ресурса электронных модулей управления, а качественные, например Ускоренные ресурсные испытания (Highly Accelerated Lifetime Test) — для выявления и последующего устранения слабых мест конструкции.

Для ускоренных количественных испытаний была использована модель Пека (Peck Model). Она основана на уравнении Аррениуса, описывающем деградацию электронных изделий под влиянием температуры:

$$\frac{1}{\tau} \approx e^{-\frac{E_a}{kT}},$$

где τ — ресурс; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Несколько упрощая, можно сказать, что увеличение температуры примерно на десять градусов снижает ресурс компонента наполовину.

Модель Пека учитывает также относительную влажность, влияющую на коррозию деталей в пластиковой упаковке (это относится только к компонентам электрических схем). Сравнивая ресурсы изделий в обычных условиях и под воздействием усиленных нагрузок, можно найти коэффициент ускорения AF_{Peck} , учитывающий ускорение деградации электроники, и, соответственно, сокращение ее ресурса

$$AF_{\text{Peck}} = \frac{\tau_{\text{use}}}{\tau_{\text{test}}} = \left(\frac{RH_{\text{high}}}{RH_{\text{use}}} \right)^n \cdot e^{-\frac{E_a}{kT} \left(\frac{1}{T_{\text{high}}} - \frac{1}{T_{\text{use}}} \right)},$$

где τ — ресурс; RH — относительная влажность, %; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — температура, К; n — коэффициент влияния технологии.

Пользуясь этими уравнениями, можно определить срок службы изделий при усиленных нагрузках, и на основании полученных результатов рассчитать срок их службы при реальных эксплуатационных условиях. Максимальные значения температуры и влажности при испытаниях будут определяться соответствующими максимальными значениями для слабейшего из компонентов системы.

В ходе HAL TEST образцы подвергаются воздействию нагрузок, существенно превосходящих типичные эксплуатационные нагрузки. Это делается для того, чтобы выявить и устранить слабые места. На ускоренные испытания ставятся как электронные, так и механические компоненты.

Для электроники важнейшими факторами такого рода являются, как известно, температура, вибрация и напряжение. Для изделий, устанавливаемых на двигателе, главными факторами стресса являются температура и вибрация.

На первой стадии определяются пределы рабочих нагрузок, т. е. верхние и нижние значения уровней температуры и вибрации, при которых начинаются нарушения нормальной работы системы. Так, в начале температурных испытаний она последовательно (ступенями) понижается до достижения нижнего предела, а затем также ступенями повышается до достижения верхнего температурного предела. Затем выполняются испытания на резкие изменения температуры, т. е. термоциклирование в пределах диапазона, ограниченного нижним и верхним температурными пределами.

Далее аналогичным образом проводятся испытания на виброустойчивость. При этом уровень вибрации ступенями повышается до тех пор, пока не начнутся отказы системы.

И наконец, образцы испытываются на совместное воздействие термического и вибрационного стрессов (рис. 2).

Следует понимать, что таких отказов, которые выявлялись бы только при интенсивных испытаниях на термо- и виброустойчивость, но невозможны в ходе нормальной эксплуатации, не существует. Результаты множества испытаний, в том числе ускоренных, проведенных как нашей фирмой, так и другими организациями, показывают, что практически любой отказ рано или поздно обязательно происходит.

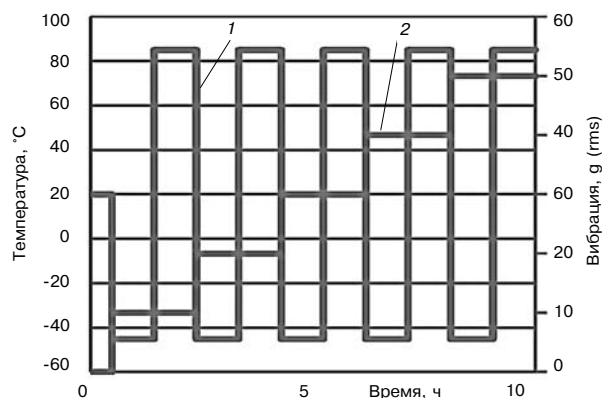


Рис. 2. HAL TEST на совместное влияние температуры и вибрации:

1 — температура; 2 — вибрация

Выводы

Описанные в докладе технологии и методы организации системного проектирования, прогнозирования и ускоренных испытаний нашли свое практическое применение и позволили реализовать целый ряд конструктивных улучшений электронных компонентов. Был сделан вывод о том, что от использования некоторых электронных компонентов, продемонстрировавших более высокую интенсивность отказов, лучше отказаться, или, при необходимости, заменить их на более надежные. К числу таких компонентов относятся электролитические конденсаторы, чувствительные к высокой температуре и пульсациям тока. В большинстве случаев вместо них лучше использовать керамические конденсаторы. Изолирующие схемы такие как, например, преобразователи, желателно проектировать как отдельные устройства, что позволит снизить интенсивность их отказов в тяжелых условиях.

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ COMMON RAIL ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ CATERPILLAR СЕМЕЙСТВА M32: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Stefan Haas,

Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG, Германия

В 2004 г. отделение Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG в Киле начало разработку системы common rail для тяжелого топлива, совместимую со всеми двигателями фирмы. Эта система получила название Caterpillar Common Rail (CCR). Первым двигателем Caterpillar, оборудованным системой CCR, стал дизель типа M32C.

Система common rail для M32C была создана на базе системы впрыска L'Orange, доработанной до требований Caterpillar в части основных технических показателей, безопасности и надежности.

Несмотря на интенсивные лабораторные испытания, проведенные в условиях, приближенных к рабочим, эксплуатационные испытания опытных образцов выявили ряд проблем, требующих решения.

В основу разработки была положена классическая система common rail с электронным управлением, способная работать на любом топливе, соответствующем требованиям IMO/SIMAS.

При создании системы особое внимание было уделено вопросам безопасности и надежности работы дизельных агрегатов в наиболее типичных для них режимах. При этом наибольшие проблемы оказались связаны с обеспечением работы двигателя на мазуте в режиме горячего резерва.

Устройство системы

Система впрыска Caterpillar Common Rail состоит из двух насосов высокого давления, сегментированных коллекторных узлов с соединительными линиями высокого давления, а

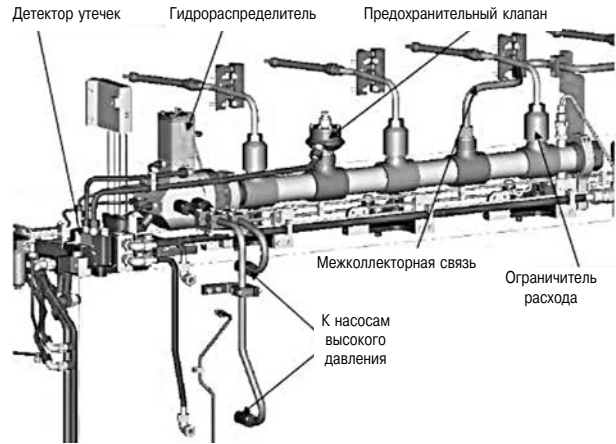


Рис. 1. Секция первого коллектора со специальными клапанами и детектором утечек

также электронных форсунок с ограничителями расхода, гидрораспределителями, предохранительными и промывочными клапанами (рис. 1).

Электронная система состоит из блока управления ЕСМ (одиночного или сдвоенного, в зависимости от назначения двигателя), трех датчиков давления в коллекторах (два датчика используются соответственно как основной и резервный, а третий является первичным прибором индикатора) и трех датчиков скорости (один на коленчатом валу, и два — на кулачковых валах). Система включает в себя также два коммуникационных модуля, куда поступает информация от всех датчиков, передаваемая затем в блок ЕСМ для дальнейшей обработки.

Концепция безопасности

В системе был использован целый ряд технических решений, направленных на обеспечение ее высочайшей надежности (особенно для применения в судовых условиях).

➤ Привод насосов высокого давления выполнен с использованием так называемых предохранительных муфт. В случае отказа насоса высокого давления такая муфта автоматически отключает насос от привода, предотвращая его разрушение и, как следствие, аварийную остановку двигателя.

➤ Предусмотрено резервирование насоса высокого давления (используются два насоса). В случае отказа одного из насосов двигатель может продолжать работу с другим насосом, развивая при этом мощность не менее 60 % от номинальной (в зависимости от числа цилиндров).

➤ Выполнено резервирование датчиков давления впрыска (с механизмом интеллектуальной оценки сигналов отказа). В случае отказа электронной системы управления давлением впрыска ее функция переходит к механическому клапану (гидрораспределителю). В случае отказа и этого клапана (если давление топлива продолжает

при этом расти) автоматически открывается предохранительный клапан, после чего давление в топливном коллекторе снижается до величины, меньшей давления открытия форсунки. При этом двигатель автоматически остановится.

➤ Установлены три датчика скорости, хотя для работы двигателя достаточно даже одного исправного датчика.

➤ Электронная система структурно состоит из основной системы и системы оптимизации. Основная система включает все датчики и исполнительные устройства, необходимые для работы двигателя, в том числе датчики давления в топливном коллекторе, скорости и давления на всасывании ТНВД. Все перечисленные устройства напрямую соединены с устройством управления. Все датчики системы оптимизации (а именно, датчики температуры ОГ, давления наддува и т. п.) соединены с устройством управления через шины.

➤ Установлены ограничители расхода топлива перед каждой форсункой, что предотвращает возможность превышения номинальной цилиндрической мощности из-за неисправности форсунки.

➤ Контроль утечек в насосах и коллекторных узлах, а также формирование аварийного сигнала при срабатывании гидрораспределителя (т. е. при переходе к механическому управлению давлением).

Описанные выше мероприятия обеспечивают более высокий уровень надежности, нежели простое выполнение типичного для большинства классификационных обществ требования сохранения работоспособности в случае единичного отказа. Тем самым гарантируется максимальная степень безопасности оператора.

Типовые испытания на двигателе системы common rail

Система проходила испытания в течение нескольких тысяч часов на стендах и на полностью укомплектованном штатном двигателе при работе как на судовом дизельном топливе, так и на мазуте, в условиях, приближенных к реальным. По результатам испытаний в конструкцию системы неоднократно вносились коррективы. При этом ставилась цель передать заказчику полностью функциональную систему в промышленном исполнении.

В 2008 г. были успешно завершены типовые испытания, и система Caterpillar Common Rail была установлена на первый двигатель 9M32C, находящийся в эксплуатации в составе вспомогательного дизель-генератора сухогруза «Edith Maersk». Процесс установки системы на двигатель с проведением приемо-сдаточных и классификационных испытаний на борту судна занял в общей сложности около восьми дней.

Режимы работы двигателя

Выбранный для испытаний дизель-генератор входит в состав судовой электростанции, состоящей из шести генераторов, пять из которых имеют дизельный привод и один — турбинный. Распределение мощности при параллельной работе происходит по статическим характеристикам, с использованием современной системы управления мощностью PMS (Power Management System). Система PMS была запрограммирована таким образом, чтобы при возрастании нагрузки первым принимал ее на себя дизель-генератор, оборудованный common rail. Кроме того, при параллельной работе нескольких генераторов именно данный агрегат всегда принимает на себя пиковую нагрузку. Иначе говоря, он сглаживает все колебания нагрузки на судовую сеть, связанные с включением и выключением различных потребителей, например, подруливающих устройств. Обычно в одном рейсе могут использоваться до трех различных видов топлива: обычный мазут, малосернистый мазут и судовое дизельное топливо. Выбор топлива зависит от текущего местонахождения судна — в акватории порта, в зоне SECA (зона ограничения выбросов SO₂) или вне зоны SECA. В периоды крейсерского плавания (когда нагрузку несет турбогенератор) дизель поддерживается в состоянии готовности к работе на обычном мазуте. При этом система common rail прокачивается мазутом при рабочей температуре.

Результаты испытаний и опытной эксплуатации

Насос высокого давления

Первый отказ насоса высокого давления (зависание плунжеров) произошел примерно через 1750 ч работы. Некоторые из новых насосов, заменивших неисправные, вышли из строя уже после 150 ч работы. Их изучение показало, что на стенках втулки плунжера образуются отложения (рис. 2), рост которых приводит к постепенному уменьшению рабочего зазора до нуля и, в конце концов, к зависанию плунжера. Как выяснилось, эти отложения по своему составу отличаются от «классического» лака, который, как известно, обладает чрезвычайно большой твердостью и удаляется только с помощью кислоты. В данном случае отложения были достаточно мягкими и легко поддавались механическому удалению.

Химический анализ отложений показал присутствие в них серы, кальция и цинка, входящих также в состав топлив, смазочных и гидравлических масел. Механизм образования этих отложений (т. е. химические и физические условия возникновения соответствующей реакции) до сих пор не вполне понятен. В настоящее время над его изучением работает группа специалистов, состоящая из представителей производителя,



Рис. 2. Отложения на стенках втулки насоса высокого давления

заказчиков и внешних экспертов. По мнению рабочей группы, эта проблема является одной из главных, которые предстоит решить поставщикам топливных систем, особенно если учесть возрастающее разнообразие топлив и возможность использования на одном судне целого ассортимента топлив (в данном случае это судовое дизельное топливо, малосернистый и обычный мазут).

В поисках решения данной проблемы L'Orange и Caterpillar совместно предложили два варианта изменения конструкции насоса. Поскольку механизм и условия образования указанных отложений пока не совсем ясны, проверка эффективности первого из предложенных решений проводилась только на одном из двух имеющихся насосов. Во время очередных рейсов судна произошло еще два отказа второго насоса, конструкция которого не менялась, тогда как модифицированный насос отработал без отказов. Затем на втором насосе был реализован другой вариант решения. С тех пор отказов не наблюдалось, наработка модернизированных насосов составила 4500 ч (первый вариант) и 3300 ч (второй вариант) соответственно.

Форсунка

Среди электромеханических устройств системы common rail наиболее сложным и ответственным узлом является форсунка с электронным управлением. Особенно большие нагрузки испытывает распылитель, игла которого находится под высоким давлением даже во время интервалом между впрысками.

Поэтому конструкции форсунки уделялось особое внимание. В ходе эксплуатационных испытаний две форсунки, после 3000 и 5500 ч работы соответственно, были сняты для ревизии и функциональной проверки, после чего возвращены на место для дальнейшей наработки. Каждая из семи первоначально установленных форсунок отработала на двигателе более 6000 ч (что соответствует их расчетному ресурсу), причем наработка двух из них уже превысила 7000 ч. Всего

имело место три отказа форсунок из-за повреждений седла иглы распылителя. Такой результат, учитывая наработку форсунок, следует считать вполне удовлетворительным.

Вообще говоря, отказы форсунок с учетом их возможных последствий считаются критическими. Вместе с тем, во время стендовых и судовых испытаний все отказы форсунок выявлялись уже на ранней стадии по небольшому (некритичному) росту температуры в данном цилиндре. Ни в одном случае отказ форсунки не вызвал срабатывания ограничителя расхода.

Гидрораспределитель

При отказе системы электронного управления (например, поврежден регулирующий клапан на всасывании насоса высокого давления или оборвана связь между устройством управления и дросселем на всасывании) гидрораспределитель осуществляет регулирование (механическим способом) давления топлива в коллекторе. Кроме того, он используется для сброса давления в системе при каждом останове двигателя. В последнем случае гидрораспределитель включается с помощью пневмопривода.

Один раз во время рейса упало давление от крытия одного из гидрораспределителей, в результате чего самопроизвольно включилась система механического регулирования давления. Подобная ситуация не является критической, к тому же оператор сразу же ее заметил по сигналу системы контроля. Гидрораспределитель был заменен на новый, который до сих пор работает безотказно.

Трубки высокого давления

Трубка высокого давления (рис. 3) является далеко не самым сложным компонентом системы, тем не менее она также может стать источником проблем из-за действующих на нее высоких нагрузок. На стадии проектирования очень большое внимание было уделено моментам, связанным с безопасностью и, в частности, обеспечению плотности гидравлических соединений в условиях постоянно действующих нагрузок, таких как тепловое расширение коллектора, неизбежные пульсации давления в коллекторе и вибрация двигателя.

Несмотря на это, во время плавания проблемы с уплотнениями то и дело возникали, особенно после первичной сборки системы. Периодическое подтягивание соединений высокого давления оказалось единственным способом обеспечить их плотность.

Было проведено глубокое расчетно-экспериментальное исследование этой проблемы, в частности, структуры уплотнения и конструкции нажимной гайки. В результате расчетов была разработана новая конструкция нажимной гайки, бы-



Рис. 3. Трубки высокого давления, соединяющие коллекторы с форсунками и друг с другом

ли внесены изменения в технологию изготовления деталей. После этого все утечки прекратились.

Датчики, исполнительные устройства и кабели

Эти элементы электронных систем управления двигателем в обозримом будущем обещают стать самой проблемной их частью. Сюда относятся, в частности, такие вопросы, как прокладка кабелей, всевозможные разъемы и ресурс датчиков. Ранее при проектировании крупных двигателей этим проблемам, возможно, не уделялось достаточного внимания. Ситуация полностью изменилась при появлении систем электронного управления впрыском, поскольку упомянутые компоненты играют жизненно важную роль в работе таких систем и обеспечении безопасности.

При выборе электрических и электронных компонентов особое внимание уделялось качеству. Во всех разъемах, например, применялись соединители Cannon, производимые по военным стандартам. Кроме того, в системе был использован блок управления ADEM IV, давно и успешно рекомендовавший себя на всех двигателях Caterpillar (рис. 4). Практически все кабели выполнены термостойкими, с тефлоновым покрытием. Все разъемы для большей надежности имеют фиксаторы. Хотя все эти меры усложняют изготовление и обслуживание системы, они себя оправдывают, так как существенно снижают вероятность отказа.

В целом результаты почти двухлетней эксплуатации системы следует оценить как вполне удовлетворительные. Все функции обеспечения



Рис. 4. Двигатель со стороны выпуска. Видны две распределительные коробки и блок ЕСМ

безопасности работали бесперебойно, и не было ни одного случая простоя из-за отказа электрической/электронной системы.

Из-за того что количество электрических и электронных компонентов опытной системы возросло на порядок по сравнению с ее предшественниками, число возможных отказов также увеличилось. Чтобы вооружить оператора надежными инструментами диагностики и поиска неисправностей, был разработан алгоритм комплексного диагностирования, включающий коды и события диагностирования. В частности, предусмотрен мониторинг и передача в общесудовую систему автоматики для вывода на дисплей следующих видов отказов: потеря данных (например, из-за выхода из строя датчика), короткое замыкание и разрыв цепи.

Выводы

Разработана система common rail M 32, которая может считаться отличной базой для дальнейшего развития будущих электронных систем впрыска. Система продемонстрировала способность к устойчивой длительной работе на мазуте в сложных условиях, характерных для судовых генераторных установок.

Однако следует еще раз подчеркнуть: то, что система нормально работала на стенде в условиях, приближенных к реальным, еще не позволяет считать процесс ее создания завершенным. Разнообразие существующих условий работы, электростанций и рабочих режимов у потенциальных потребителей слишком велико, чтобы все можно было заранее проверить на стенде. Поэтому обязательным условием создания законченного и высококачественного изделия является тесное сотрудничество между разработчиком, субподрядчиками и будущими операторами.