

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДНЕ- И ВЫСОКОБОРОТНЫЕ ДИЗЕЛИ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ

*М.Ю. Иванов; Российский морской регистр судоходства
В.А. Шишкин, А.П. Петров;*

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций

В судовых средне- и высокооборотных дизелях в значительной степени заимствован более чем 15-летний опыт производителей дизелей дорожного транспорта в применении новых технологий управления в системах топливоподачи, газообмена и др. На опыте ведущих дизелестроительных фирм показаны достижения в части разработки и применения электронных систем и средств управления.

В среднеоборотных дизелях (СОД) практически монопольное распространение получили применение электронные системы управления (ЭСУ) топливными системами высокого давления типа «Common Rail» (CR) [1], по существу представляющих собой аккумуляторные топливные системы.

В судовых дизелях использование топливных систем высокого давления с гидравлическим аккумулярованием в баллоне известно достаточно давно. В малооборотных двигателях их применяли фирмы «Doxford» и «Mitsubishi Heavy Industries». При этом фирма «Doxford» начинала с варианта аккумуляторной топливной системы с механически управляемыми форсунками-дозаторами, а затем перешла к применению отдельных клапанных дозаторов с механическим приводом от небольшого распредвала, через которые топливо поступало из аккумулятора к обычным форсункам. Фирма МНІ при разработке первых вариантов своей модели малооборотного двигателя UEC также пыталась применить аккумуляторную топливную систему с механическим дозатором. Аккумуляторная топливная система с золотниковым дозатором была разработана и испытана на экспериментальном отсеке 4ДКРН75/160 Брянского машиностроительного завода.

В СОД LS-8 аккумуляторные топливные системы применялись, в частности, фирмой Coorper Bessemer.

Следует заметить, что давление топлива в этих системах составляло 420–470 бар на полном ходу и снижалось до 220 бар на режимах малых нагрузок.

Среди современных СОД с ЭСУ обращают на себя внимание работы фирмы MAN B&W [2] по

оснащению системами CR четырехтактных среднеоборотных двигателей 32/40 с цилиндровой мощностью 500 кВт при частоте вращения 750 об/мин. Двигатель имеет степень сжатия 14,5, скорость поршня 10 м/с, среднее эффективное давление 2,39 МПа. Давление в системе CR составляет 160 МПа.

Один из пяти вспомогательных дизель-генераторов этого типа на контейнеровозе «Cornelia Maersk» имеет наработку более 12 000 ч.

Фирма «Volvo Penta» применила [3] систему CR на четырехцилиндровых высокооборотных дизелях (ВОД) с четырехклапанными головками в составе дизель-генераторов D4-260 мощностью 155 и 260 кВт.

Фирма «MTU Detroit Diesel» применила данную систему на дизелях типа 2000/4000/8000. Разработка системы топливоподачи CR была выполнена в августе 1997 г. фирмой «LOrange GmbH» [4], вошедшей в состав фирмы «MTU Detroit Diesel» в 1995 г. При этом разработчики исходили из того, что обеспечение необходимых характеристик впрыска топлива в цилиндр двигателя является самым эффективным способом обеспечения требований к экологическим параметрам дизелей.

Первоначально разработка CR предназначалась для тепловозных дизелей. Примером тому явился дизель MTU 16V4000R41 с системой CR, установленный на тепловозе серии 218. Сравнительные испытания тепловозов с двигателями, оснащенными обычной системой топливоподачи и системой CR, показали, что снижение выбросов NO_x составило до 34 %, а твердых частиц — до 67 % от величин, обычных для штатного дизеля. Кроме того, было отмечено снижение удельного расхода топлива. В состав CR входили электронная система управления, радиально-поршневой насос производительностью 20 л/мин, аккумулятор давления на 120 МПа, регулятор давления. Система была предназначена для дизелей с цилиндровой мощностью 180 кВт.

В 2000 г. система CR применена этой фирмой на дизелях типа 8000 уже в иной комплектации: с аккумулятором на 180 МПа, рядным ТНВД производительностью до 34 л/мин (для дизелей с цилиндровой мощностью 450 кВт), с подачей масла от системы смазки двигателя (для исключения

влияния возможного высокого содержания воды в топливе).

Вторая модификация ТНВД для СР запущена в 2002 г. и предназначена для дизелей MTU/DDC типа 4000, дизель 20 V. В данном случае давление в аккумуляторе составляло 140 МПа, а производительность насоса 32 л/мин. Испытания по циклам, рекомендованным Агентством по охране окружающей среды (EPA, США), продемонстрировали снижение дымности отработавших газов до числа 0,16 FSN и удельный расход топлива 200 г/кВт·ч (рис. 1).

Одновременно был запущен важный проект по созданию системы HFO-CR, работающей на тяжелом топливе. В том числе новая разработка использована на дизеле Wartsila W32CR цилиндрической мощностью 460 кВт при 750 об/мин. Двигатель установлен на контейнеровозе «Alex Maersk».

Двигатели фирмы «Wartsila» типа 32, 38, 46. ТНВД этих двигателей [4, 5] представляет собой обычный насос, конструктивное отличие которого состоит в отсутствии винтовой кромки на плунжере. Один насос питает два цилиндра двигателя при давлении 150 МПа при подаче 8 л/мин с гидроприводом толкателя под давлением смазочного масла дизеля.

Насос выполнен в двух модификациях: для дизельного и тяжелого топлива. Первая модификация в 2- и 4-цилиндровом исполнении при давлении

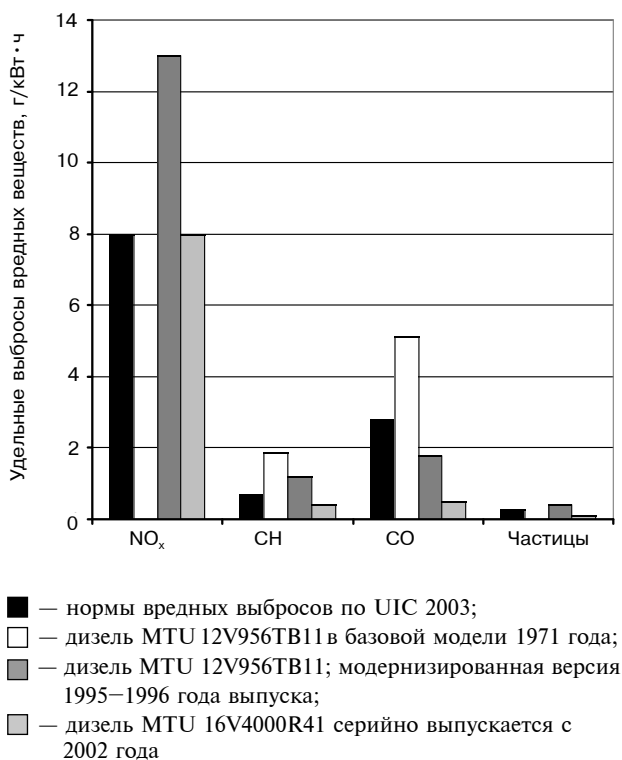


Рис. 1. Нормы вредных выбросов и выбросы вредных веществ дизелей MTU

180 МПа, вторая — в 2-цилиндровом исполнении при давлении 150 МПа производительностью 32 л/мин или 16 л/мин соответственно. Конструктивное отличие насосов состоит в различных уплотнениях и применяемых для клапанов материалах. Основные характеристики насосов приведены в табл. 1.

Система обеспечивает мощный диапазон дизелей от 1000 до 12 000 кВт.

Конструкцией ТНВД предусматриваются меры, не допускающие смешивания топлива и смазочного масла.

Аккумулятор высокого давления встроен в верхнюю часть ТНВД и предназначен для уменьшения колебаний давления в элементах HFO-CR (трубопроводах, общей магистрали, форсунках). Все насосы на переднем торце имеют два выходных отверстия магистрали высокого давления для соединения с трубопроводами.

Дроссельный всасывающий клапан (ДВК) сохраняет высокое давление в аккумуляторе при малой нагрузке дизеля.

Основными компонентами ТНВД являются: насосная секция; кулачковый вал с шестерней привода и кулачками; ролик; радиально-упорные подшипники; аккумулятор; ДВК; впускной клапан и клапан постоянного давления (ре-

Таблица 1

Характеристики ТНВД системы HFO-CR

Номинальная производительность	32 л/мин (16 л/мин*)
Давление топлива	140–180 МПа, в зависимости от назначения и сорта топлива
Конструкция	Рядный
Привод плунжеров	От кулачкового вала
Диаметр плунжера	14 мм
Ход плунжера	20 мм
Наполнение	Электромагнитный всасывающий дроссельный клапан
Управление по цилиндру	Впускной/выпускной клапан в корпусе
Количество выступов на кулачке	1
Номинальная частота вращения кулачкового вала	3150 об/мин
Максимальная частота вращения кулачкового вала	3650 об/мин
Минимальная частота вращения кулачкового вала	800 об/мин
Давление топлива на входе	0,65±0,1 МПа
Давление масла	0,4–0,7 МПа в зависимости от частоты вращения и нагрузки
Подача масла	18 л/мин (10 л/мин)

гулятор давления); пакет пружин толкателя для отделения топливной и масляной сред. У насоса одно направление вращения — левое. Значения в скобках даны для 2-цилиндрового насоса

Разработанные фирмой рядные насосы обеспечивают все типоразмеры двигателей от четырехцилиндровых с цилиндровой мощностью 100 кВт с одним насосом до 18-цилиндровых с цилиндровой мощностью 1200 кВт с четырьмя насосами.

В данном насосе не реализуется функция управления началом и концом впрыска топлива в цилиндры двигателя и отсутствуют гильзы с впускными окнами. Поток топлива обеспечивается впускными и выпускными клапанами. Подпружиненный впускной клапан остается открытым на все время хода плунжера из крайнего верхнего в крайнее нижнее положение. Гидравлический КПД достигает 85 % и всегда составляет более 80 % при частоте вращения, большей 50 % от номинальной. На ходе сжатия впускной клапан закрывается и предотвращает обратный поток топлива в систему низкого давления. Топливо под давлением поступает в аккумулятор за время полного хода плунжера. Когда плунжер достигает крайнего верхнего положения, выпускной клапан закрывается. Оба клапана, впускной и выпускной, имеют размеры, позволяющие минимизировать гидродинамическое сопротивление и увеличить сопротивление износу этих узлов. Используемые материалы имеют высокую стойкость по отношению к эрозии и коррозии, механическим напряжениям вследствие высокого давления в насосной секции. Утечки, возможные через зазоры между плунжером и гильзой, возвращаются через сливное отверстие на выпуск. Нижний конец плунжера имеет уплотнительное кольцо, сокращающее утечки топлива. Большое внимание уделено уплотнению полости высокого давления аккумулятора, которая даже при предельно допустимых давлениях является герметичной.

Аккумулятор размещен на верхней части корпуса насоса и насосной секции напротив кулачкового вала. Здесь собирается все топливо из насосных секций и заполняет сравнительно малый объем аккумулятора (0,11 л в случае 4-цилиндрового насоса), который уменьшает любые пиковые колебания давления сжатого топлива в общей магистрали (CR) и системе трубопроводов высокого давления. Два выхода из аккумулятора обеспечивают поступление топлива к двум цилиндрам дизеля.

Кулачок, несущий кулачковый ролик, роликовый штифт и опора пакета пружин выполнены из материалов, выдерживающих высокие механические напряжения и обладающие малой

инерцией. Наружный диаметр имеет специальную термическую обработку, чтобы уменьшить трение между роликом и толкателем. Роликовый штифт установлен в толкателе и предохраняет ролик от проворачивания и осевого перемещения. Внешняя поверхность ролика имеет специальный профиль для равномерного распределения нагрузки. Во вращающемся ролике — втулка, на которой установлен радиально-упорный подшипник. Пакет пружин состоит из внешней и внутренней пружин. Внутренняя пружина толкает плунжер в течение фазы всасывания, в то время как внешняя пружина держит кулачок в контакте с профилем кулака.

Кулачковый вал опирается на три радиально-упорных подшипника в 4-цилиндровом насосе и на два подшипника — в 2-цилиндровом насосе. Кулачковый вал разработан на основании результатов эмиссионной микроскопии, чтобы равномерно распределить напряжение на всем валу.

Корпус насоса выполнен из чугуна и сообщен с системой смазки дизеля или топливной системой стандартным штуцером. Часть смазочного масла распределяется в корпусе направляющей толкателя, обеспечивая смазку кулачков, роликовых штифтов и роликовых подшипников. Другая часть масла подается к подшипникам кулачкового вала.

Количеством жидкого топлива, подаваемого в насос, управляет ДВК, который гарантирует высокий гидравлический коэффициент полезного действия. Поток через всасывающий дроссель управляет пропорциональный электромагнит. Он изолирован от топлива, чтобы исключить любое агрессивное топливное воздействие.

Насосы были подвергнуты серии стандартных испытаний на топливных и дизельных стендах. КПД насоса по скоростной характеристике в диапазоне от 750 до 3150 об/мин изменялся от 62 до 83 % с максимальным значением в 85 % при частоте вращения 2750–2900 об/мин. Подача при этом изменялась от 6 до 32 л/мин.

Для серийной продукции по согласованию с потребителями ревизия элементов назначается после 3-х и 8 тыс. ч работы. Ревизия после 24 000 ч испытаний позволяет установить общий ресурс элементов в зависимости от условий эксплуатации.

Большое давление топлива выдвигает высокие требования к прочности деталей топливной аппаратуры. Поэтому для оценки прочности насосных элементов, подверженных влиянию высокого давления, было применено моделирование методом конечных элементов.

Первые насосы установлены на СОД и ВОД различного назначения, в том числе на скоростном пароме-катамаране постройки фирмы

«Austal» в Гонконге, на карьерном автосамосвале T282 фирмы «Liebherr» в карьерах шахты Chuquicamata (Чили), на тепловозах «Siemens Rh» 2016 железных дорог Австрии.

Дизели фирмы «Wartsila» с системой CR в течение последних лет имеют значительную наработку как на судах, так и в иных условиях.

В числе СОД и ВОД с электронными системами управления их функционированием особого внимания заслуживают двигатели фирмы «Caterpillar». По публикуемым данным, среди фирм, внедряющих электронные технологии управления на дизелях этой оборотности, лишь «Caterpillar» решает задачу повышения экономичности и улучшения экологических параметров комплексно, используя гибкое управление как топливоподачей, так и газообменом. По-видимому, в этом, а также в сочетании применения различных технологий управления кроется успех завтрашнего развития судовых установок с быстроходными дизелями.

Система управления с электронно-управляемой механической насос-форсункой устанавливается на большинстве двигателей «Caterpillar» рабочим объемом 10–16 л. Основной особенностью системы является высокое давление впрыска топлива, достигающее 200 МПа, по сравнению с системами РЕЕС (механическая форсунка), у которых оно не превышает 120 МПа.

В последние годы фирма инвестировала значительные средства в создание и развитие ACERT (Advanced Combustion Emission Reduction Technology — улучшенной технологии снижения эмиссии при сгорании) технологии [7, 8], позволяющей за счет:

- совершенствования топливоподачи путем применения многоступенчатого регулируемого впрыска топлива в камеру сгорания, в том числе системы CR — Single Fluid Common Rail (SFCR) [9], — обеспечивающего достижение максимальной мощности при минимальных выбросах вредных веществ;

- совершенствования газообмена за счет применения клапанов с управляемым временем открытия, двух турбокомпрессоров в системе наддува с малым временем разгона и меньшими частотами вращения ротора;

- широкого применения электроники, управляющей процессами топливоподачи, газообмена — HEUI, использования гибкой технологии привода впускных клапанов — Flex Cam Technology (FCT), разработанной фирмой MaK, и др.;

- совершенствования конструктивных особенностей, влияющих на процесс сгорания, — добиться достижения потребительских свойств дизелей, опережающих требования эксплуатирующих организаций.

Основное направление применения новой технологии — снижение выбросов вредных ве-

ществ с отработавшими газами и снижение дымности, создание двигателей LEE — low emission engine — с низкими значениями выбросов вредных веществ. Реализуя эту технологию в два шага, вначале применив FCT, а затем совместно с известной более 10 лет усовершенствованной системой HEUI — Hydraulic Electronic Unit Injector (с электронно-управляемой насос-форсункой с гидравлическим приводом), фирма рассчитывает добиться существенного улучшения экологических показателей. Дымность отработавших газов предполагается уменьшить до числа 0,5 FSN, а выбросы окислов азота — до 6 г/кВт·ч, превзойдя требования IMO II.

Необходимо обратить внимание на другую особенность двигателей с электронными системами управления, а именно на электронную систему управления.

С момента появления первых двигателей и до настоящего времени осуществляется совершенствование компьютера (ЕСМ) двигателя [10], который на первых двигателях имел 8-битовый процессор, затем 16-битовый. В настоящее время ЕСМ ADEM-III (Advanced Diesel Engine Management) имеет 32-битовый процессор с частотой 24 МГц как элемент технологии ACERT. Изменялось при этом и количество входов, ввиду необходимости увеличения числа датчиков для учета большего перечня рабочих параметров и внешних условий. Начинается оснащение ЕСМ ADEM-IV, имеющих 170 входов и линий связи с двигателем.

У двигателей типа РЕЕС и у всех последующих типов электронных двигателей ЕСМ включает две основные части — управляющий компьютер и персональный модуль. Персональный модуль ЕСМ является перепрограммируемым и представляет собой чип, содержащий программное обеспечение компьютера, рабочие таблицы, определяющие закон подачи топлива и закономерности функционирования в различных режимах, а также содержит информацию о конкретном применении двигателя. Персональный модуль содержит такие параметры, как максимальная мощность и максимальный момент данного двигателя. Указанные параметры определяются заводом-изготовителем в зависимости от назначения конкретно взятого двигателя и от его мощности, частоты вращения и момента, т. к. одна и та же модель может иметь двух-, трехкратную разницу по уровню форсировки и, соответственно, различный ресурс и различную цену. В общей сложности ЕСМ может иметь более ста различных программируемых параметров в зависимости от области применения дизеля и модели ЕСМ. Для двигателей серии РЕЕС количество программируемых параметров минимально.

Файл, загружаемый в персональный модуль, может быть заменен из библиотеки, постоянно обновляемой фирмой через Интернет или иным образом, бывает съемным или установленным стационарно. Таким образом, изменение уставок выполняется не с помощью регулировок на регуляторе скорости, как на обычных дизелях, а в файле при помощи специального электронного оборудования — компьютера со специальной программой. Это дает возможность значительно упростить процесс контроля и управления двигателем, увеличивает надежность, частично уменьшает объем технического обслуживания.

В неперепрограммируемой части ЕСМ заложены алгоритмы управления двигателем. Информация об объявленных параметрах двигателя, приведенная в информационных данных двигателя, вносится в персональный модуль ЕСМ и изменяется по заводскому pin-коду.

Помимо основных задач управления рабочими процессами дизеля, ЕСМ обеспечивает решение следующих задач:

- мониторинг показаний датчиков с выявлением некорректных показаний;
- самотестирование электронной системы с выводом активных кодов-извещений о неисправностях компонентов электронной схемы в текущий момент времени;
- сохранение в памяти имевших место выводов информации об активных кодах в прошлом. При этом фиксируется количество таких выходов, а также наработка, при которой логистический код имел место в первый и последний раз (зарегистрированные коды могут быть удалены с помощью специальной программы);
- сохранение в памяти имевших место выходов рабочих параметров за установленные пределы, т. е. неисправностей двигателя (Events), таких, например, как перегрев, превышение установленных пределов оборотов, низкое давление смазочного масла и др. Эта информация может быть удалена из памяти только с помощью специального инструмента при получении заводского пароля;
- выполнение тестов и калибровок некоторых элементов по командам от специальной программы. Датчики, установленные в различных системах

двигателя, отслеживают параметры, после чего полученная информация посылается ЕСМ.

Применение ЭСУ существенно расширило поле эксплуатационных режимов дизелей (рис. 2), а также снизило удельную массу G_v дизелей. В табл. 2 представлены данные по дизелям 3406 и 3508, показывающие снижение G_v на 8 % в первом случае и на 32 % — во втором.

Дизель TCD 2016 фирмы DEUTZ AG известен на рынке с октября 2003 г. Это 16-цилиндровый двигатель мощностью 1500 кВт, предназначенный для установки на прогулочные суда.

На базе этого двигателя была создана новая модификация TCD 2016 V 16 CR, объединяющая технологию CR со средствами контроля и повышения надежности дизеля [11]. Это позволило увеличить мощность дизеля, снизить удельный эффективный расход топлива с учетом ограничений по выбросам вредных веществ с отработавшими газами.

Основные размеры дизеля остались неизменными. При размерности 132/160 (мм) рабочий объем цилиндра составляет 2,19 см³. При развале цилиндров в 60° дизель имеет небольшую ширину, и его габариты соответствуют ограниченному объему машинных помещений. В результате мощность дизеля была увеличена до 1840 кВт при частоте вращения 2300 об/мин (при цилиндрической мощности 115 кВт). Среднее эффективное давление при этом составляет 2,73 МПа, а удельный эффективный расход топлива 211 г/кВт·ч. Индекс дымности был ниже 1.

Система CR размещена в развале блоков между воздушными ресиверами. Такое размещение позволило сократить количество узлов и массу системы. Все трубопроводы высокого давления имеют одинаковую длину. Ниже магистрали находится ТНВД с приводом через передачу от дизеля.

Собственно система состоит из привода, подкачивающего насоса, фильтров, ТНВД, магистрали с трубопроводами и форсунок. По сравнению с базовым двигателем отличие состоит в приводе насосов: подкачивающего и ТНВД.

Вместе с системой управления обеспечивается увеличение мощности дизеля при соответствующих ограничениях ИМО выбросов вредных веществ. В дополнение к этому уменьшена температура

Таблица 2

Технические данные дизелей с традиционной системой топливоподачи (3406С, 3508 D) и с ЭСУ (3406Е, 3508 D-hp)

Двигатель	Частота вращения, об/мин	Мощность, л. с.	Масса, фунт	Удельная масса, фунт/л. с.
3406С	2100	480	2920	6.08
3406Е	2100	600	3326	5.54
3508D	1800	1150	11500	10.00
3508В D-hp	1880	1500	10182	6.79

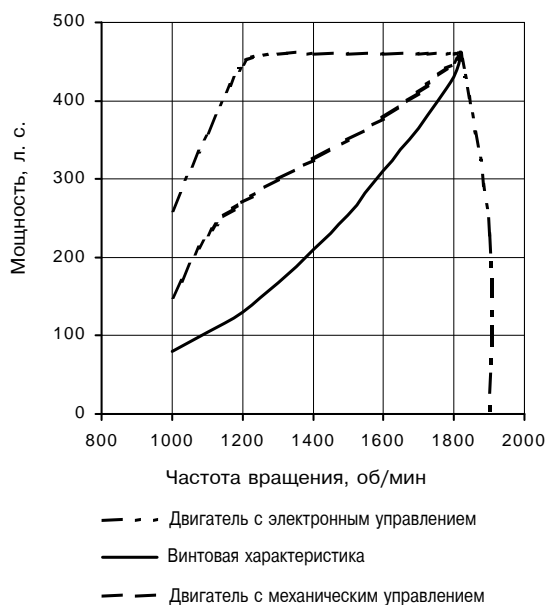


Рис. 2. Внешняя характеристика дизеля 3406 с различными видами управления

выпускных газов и механические напряжения в деталях дизеля. Это достигается за счет точного дозирования впрыскиваемого топлива, времени впрыска, возможности управления впрыском по фазам — предварительного, основного и последующего — при давлении топлива 160 МПа.

С конструктивной точки зрения разработчики считали важным разместить форсунки на головке цилиндров. Применение форсунки с малым наружным диаметром позволило избежать развития размеров головки цилиндров.

Форсунка новой конструкции имеет меньшие габаритные размеры и менее затратна в производстве. Поскольку движение топлива к распылителю происходит вдоль иглы, корпус форсунки приобрел малый наружный диаметр. Уплотнение вдоль иглы, разделяющее области высокого и низкого давления, позволило увеличить допуски на изготовление иглы и корпуса сверх обычно принятых. Отмечается, что конструкция электромагнитного клапана исключает возможные утечки топлива.

Электронный блок управления ECU (Engine Control Unit) состоит из нескольких функциональных узлов, выполняющих основные функции управления: регулирование частоты вращения, давления топлива в магистрали, количества впрыскиваемого топлива и времени впрыска, зависящих от режима работы двигателя. Соответственно, осуществляется управление секциями клапанов и электромагнитными форсунками в функции частоты вращения по сигналу от электромагнитного датчика частоты вращения и датчика высокого давления.

Кроме того, ECU регулирует температуры охлаждающей воды и выпускных газов, давление наддува и частоту вращения турбокомпрессора. В ECU встроен блок аварийно-предупредительной сигнализации.

Анализ разработок перспективных моделей СОД и ВОД с ЭСУ позволяет считать, что наряду с процессами впрыска топлива процессы газообмена, наддува, лубрикаторной смазки, пуска и реверсирования постепенно будут управляться электронными системами, аналогично тому, как это реализовано сегодня в малооборотных дизелях с ЭСУ. Это позволит не только отказаться от распределительного вала с его приводом, но и обеспечить высокую адаптивность быстроходных дизелей к изменениям условий эксплуатации.

Разработка и применение новых систем управления и технологий управления процессами в современных судовых дизелях позволили создать определенный технологический задел, обеспечивающий удовлетворение огромным парком дизелей различного назначения возросших экологических требований в течение ближайшего десятилетия.

Литература

1. Обзор докладов по системам «Common Rail» на конгрессе CIMAC-2004, Киото // Двигателестроение. — № 2. — 2006. — С. 44–52.
2. Man B&W Common Rail — a leap in technology diesel for marine engines. Special advertising supplement to The Motor Ship, 2004, sept.
3. Volvo Penta launches D9 heavy duty unit. The Motor Ship, 2004, nov.
4. Jorach R.W., Schneider H., Kerckhoff A.J., Altmann O. From high speed diesel to medium speed HFO engines — L'Orange platform based common rail pumps fulfill future demands. CIMAC Congress, Kyoto, 2004.
5. Rosgren C.-E. Common rail on Wartsila four-stroke engines. Diesel and Gas Turbine, 2004, sept.
6. Шишкин В.А., Петров А.П., Иванов М.Ю. Развитие двухтактных малооборотных ДВС с электронным управлением // Двигателестроение. — № 2. — 2006. — С. 26–31.
7. Lustgarten G. Developing ACERT® Technology. ACERT. pdf. Power Systems Engineering Caterpillar Inc.
8. Engines of Caterpillar Motoren. CIMAC Congress 2001.
9. BC Ferries chooses MaK. The Marine Technology Magazine, 2005, june.
10. Никитин А.М. Диагностирование электронных дизелей. Учебное пособие. — СПб.: ГМА им. С.О. Макарова, 2004. — 60 с.
11. Kamleitner E., Coester R. Design and Layout of the new Deutz TCD 2016 V16 Common Rail Engine. CIMAC Congress, Kyoto, 2004.