

РАЗВИТИЕ ДВУХТАКТНЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДВС С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*В.А. Шишкин, А.П. Петров,
Санкт-Петербургский Государственный Университет Водных Коммуникаций,
М.Ю. Иванов,
Российский Регистр Морского Судоходства*

Бурное развитие электронных технологий, создание быстродействующих электромагнитных устройств, сопутствующих исполнительных гидравлических систем управления позволило создать малооборотные дизели с гибкими системами управления, обладающие целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными установками. Типичными представителями нового поколения дизелей являются дизели ME (MAN B&W) и UEC-Eco (MHI), а также RT-flex (Wartsila NSD), реализующие разные технологии управления.

В 90-х годах прошлого столетия в развитии судовых малооборотных дизелей появилось новое направление — применение электронного управления основными процессами функционирования дизеля (подача топлива, воздуха, цилиндрического масла, выпуск отработавших газов) взамен традиционного механического управления с помощью кулачковых распределительных валов [1–3, 8, 9].

Фирма MAN B&W начала разработку электронной системы управления для судовых малооборотных дизелей ME в 1990 году [4–6]. В феврале 2003 г. на стенде завода в Фредериксхавене был представлен первый коммерческий дизель 7S50ME-C, предназначенный для установки на т/х «Bow Firda», а к августу того же года фирма и ее лицензиаты имели заказы на 25 дизелей типа ME, включая 7 дизелей 12K98ME мощностью 68 500 кВт каждый [7].

Конструкция дизеля типа ME лишена следующих компонентов: цепного привода; отсека цепного привода; распределительного вала; механизма привода толкателей топливных насосов и выпускных клапанов; топливных насосов высокого давления; воздухораспределителя; механического регулятора частоты вращения с приводом; механического привода лубрикаторов цилиндров.

Для выполнения функций изъятых компонентов предусмотрены следующие устройства:

➤ гидравлический агрегат для подачи масла под высоким давлением — далее сервомасло (HPS — Hydraulic Power Supply);

➤ исполнительные гидравлические агрегаты для каждого цилиндра (HCU — Hydraulic Cylinder Units);

➤ система определения угла поворота коленчатого вала;

➤ лубрикаторы цилиндров с электронным управлением;

➤ местная панель управления (LOP — Local Operating Panel).

➤ система управления двигателем (ECS — Engine Control System).

ECS обеспечивает выполнение следующих функций: электронное управление изменением давления впрыскиваемого в цилиндр топлива (EPIC — Electronically Profiled Injection); управление открытием и закрытием выпускных клапанов; управление количеством и фазами подачи топлива в цилиндры; управление процессами и процедурами пуска и реверса, включая остановку дизеля с подачей контрвоздуха; регулирование частоты вращения; управление вспомогательными воздухоподводками; управление процессами смазки цилиндров.

Агрегат HPS включает в себя навешенные на дизель аксиально-поршневые насосы переменной производительности для подачи сервомасла давлением до 250 бар к HCU с приводом от дизеля либо от электродвигателей. Производительность насосов регулируется общей электронной системой управления. Всего предусматривается три насоса — два в работе и один в резерве. Агрегат содержит фильтры грубой и тонкой очистки.

На рис. 1 показана общая схема системы сервомасла. К гидронасосам системы масло поступает из общей магистрали смазочного масла через фильтр тонкой очистки. От гидравлического агрегата HPS масло под давлением 200 бар по трубопроводу с двойными стенками подается к HCU, смонтированным на общей фундаментной плите, расположенной на верхней платформе дизеля. На трубопроводе предусмотрено предохранительное устройство и гидравлический аккумулятор. Отработавшее в гидравлических агрегатах масло сливается в маслосборную цистерну дизеля.

HCU, будучи исполнительным механизмом, выполняет те же функции, что и топливные

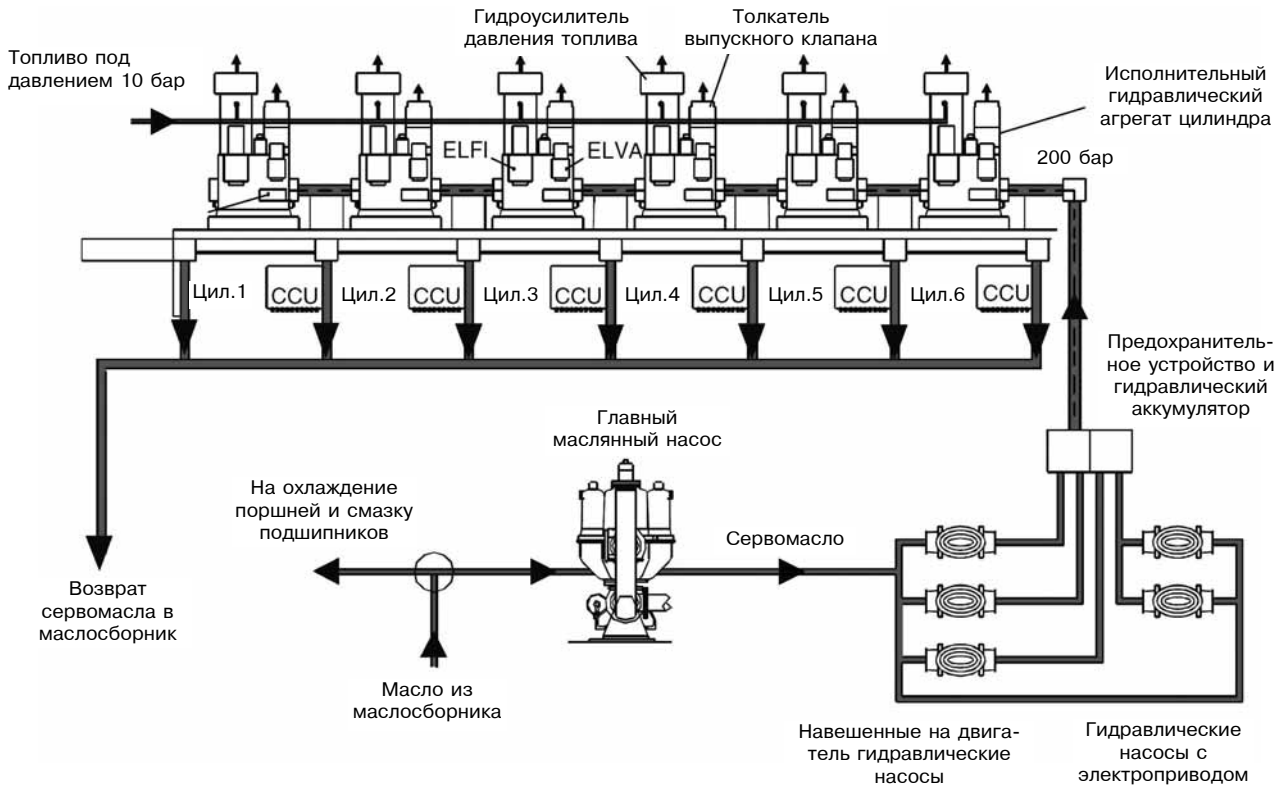


Рис. 1. Схема системы сервомасла масла

насосы высокого давления, лубрикатеры цилиндров и толкатели выпускных клапанов в традиционных дизелях. Однако наличие в них электромагнитных клапанов, управляемых ECS, позволяет в зависимости от режима работы дизеля гибко регулировать фазы распределения.

На рис. 2 показана схема системы впрыска топлива в цилиндр. В дизелях введен промежуточный элемент — гидроусилитель — аналог традиционного топливного насоса высокого давления. Такое решение позволяет отделить высоконапорные трубопроводы, заполненные горячим топливом, от общей магистрали с регулирующими устройствами (при использовании тяжелого топлива его температура может превышать 160 °С). Горячее топливо не поступает в прецизионные быстродействующие управляющие клапаны. Это, по мнению разработчиков, повышает надежность системы.

Система обеспечивает необходимое давление топлива, формирование фаз топливоподачи, формы кривой давления, однофазный и двухфазный впрыски топлива.

Следующей особенностью дизелей типа ME с ЭСУ является отсутствие распределителя пускового воздуха с механическим приводом. Его функции выполняют двухпозиционные клапаны с электронным управлением, расположенные на трубопроводе пускового воздуха позади крышки каждого рабочего цилиндра (рис. 3).

Взамен лубрикаторов с механическим приводом на дизелях типа ME для смазки рабочих цилиндров применяются лубрикатеры «Alfa» [3] с гидравлическим приводом и электронным управлением, устанавливаемые на исполнительном гидравлическом блоке каждого цилиндра. Подача масла под высоким давлением к силовому поршню осуществляется через электромагнитный клапан, управляемый многоцелевым электронным контроллером, на который поступает также сигнал от датчика перемещения поршня лубрикатора. Количество подаваемого масла определяется содержанием серы в топливе и нагрузкой дизеля. В программу управления заложен нижний предел подачи масла — 0,3 г/кВт · ч.

Помимо описанных механических устройств на двигатель устанавливается два датчика угла поворота коленчатого вала (один рабочий, а другой резервный). Электрический сигнал от датчика вводится в электронную систему управления двигателем и является основой для регулирования фаз газораспределения и топливоподачи в соответствии с режимом работы дизеля.

Структурная схема электрической системы дистанционного автоматического управления (ДАУ) судовым двигателем типа ME включает в себя электронные компоненты. Предусматривается три обычных типовых поста управления. Каждый из постов оборудован устройствами для выдачи оператором управляющих команд (пуск, остановка,

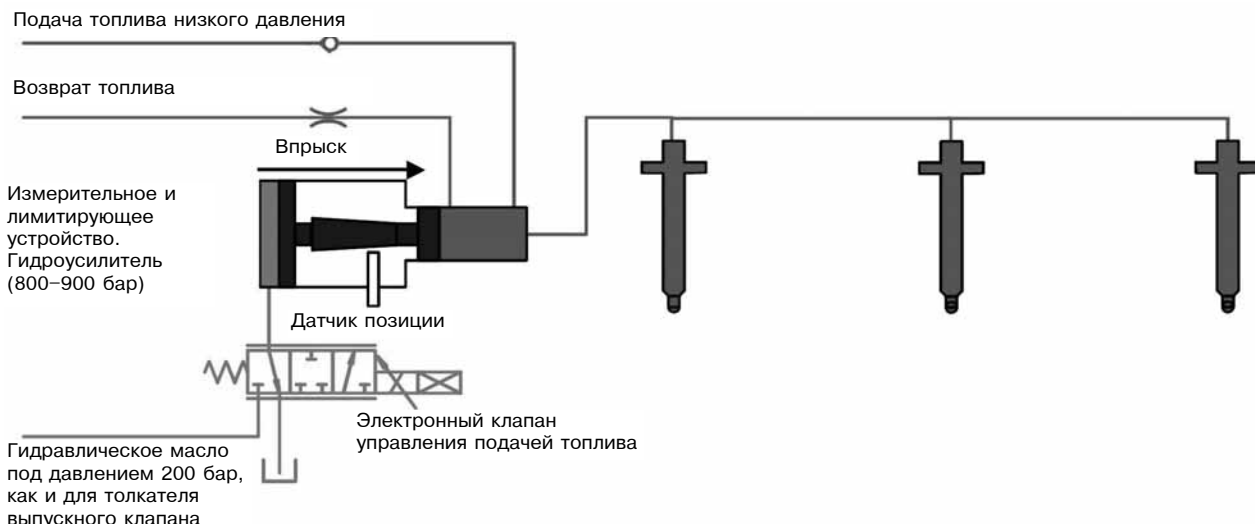


Рис. 2. Схема системы впрыска топлива в цилиндр

реверс, частота вращения и т. д.). Кроме командного сигнала в систему поступает сигнал от датчика частоты вращения и угла поворота вала.

В систему входят следующие электронные блоки [10]:

- блок связи постов управления EICU, расположенный в центральном посту управления;
- блок управления двигателем ECU, обеспечивающий последовательность операций при пуске и реверсе, выход на выбранный режим и поддержание частоты вращения;
- блоки управления вспомогательными механизмами 3-го блока АСУ, обеспечивающие управление силовым гидравлическим агрегатом и вспомогательными воздухоудувками. Включение и отключение воздухоудувок производится по сигналу от датчика давления продувочного воздуха;
- блоки управления цилиндрами ССУ — по числу цилиндров дизеля). ССУ управляет клапаном подачи топлива в цилиндр ELFI, клапаном открытия выпускного клапана ELVA, пусковым клапаном и подачей цилиндрического масла.

Отсутствие механической связи основных агрегатов дизеля с коленчатым валом предъявляет очень высокие требования к надежности электронно-гидравлической системы управления. Как уже отмечалось выше, надежное обеспечение гидравлической части системы маслом под высоким давлением достигается за счет резервирования насосов агрегата HPS.

В электронной части системы основные управляющие блоки EICU и ECU продублированы так, что при отказе одного из них автоматически подключается резервный блок. В случае отказа блока ССУ система управления отключает подачу топлива в неисправный цилиндр (золотниковый

клапан ELFI блокируется) и двигатель продолжает работать на остальных цилиндрах. Неисправный блок заменяется запасным без остановки дизеля. Конструкция блока одинакова для всех цилиндров, поэтому после установки резервного блока он должен быть сконфигурирован и запрограммирован для работы на нужном цилиндре. Для этого предусмотрена специальная процедура с использованием копии программного обеспечения, хранящейся в центральном посту управления.

Срок службы электронных схем, как правило, меньше срока службы двухтактного малооборотного дизеля, поэтому фирма MAN B&W использует на дизелях ME электронные блоки собственной разработки. Это, по ее мнению, гарантирует возможность поставки запасных блоков в течение всего срока службы дизеля.

Применение электронного управления благодаря его гибкости обеспечивает эксплуатационнику ряд преимуществ по сравнению с традиционным механическим управлением:

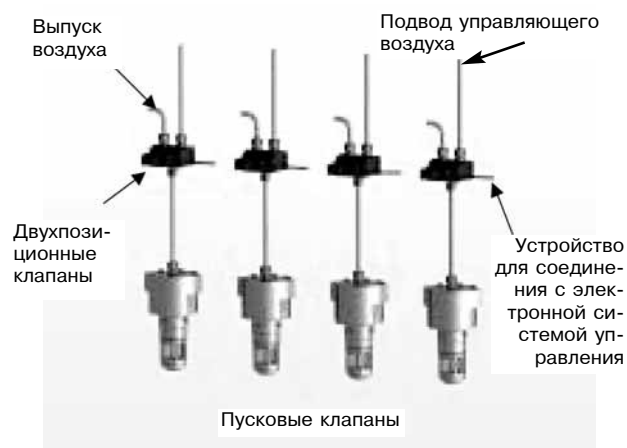


Рис. 3. Схема системы управляющего пускового воздуха

➤ *Снижение расхода топлива.* Электронная система управления позволяет оптимизировать удельный расход топлива на разных режимах путем изменения углов и давления подачи топлива, а также изменением угла открытия и закрытия выпускного клапана. Путем сокращения продолжительности подачи топлива за счет увеличения давления и уменьшения угла открытия выпускного клапана изменяют кривую давления газов в цилиндре на текущей нагрузке дизеля. Повышение максимального давления газов и степени сжатия приводит к снижению удельного расхода топлива примерно на 5 г/кВт·ч.

Дополнительную экономию топлива дает встроенная система мониторинга максимального и среднего индикаторного давления, позволяющая своевременно реагировать на нарушения в рабочем процессе в цилиндрах.

➤ *Улучшение маневренности дизеля.* Возможность изменения фаз топливоподачи и открытия выпускных клапанов позволяет оптимизировать процессы аварийного реверсирования, пуска и разгона дизеля. Например, при разгоне более раннее открытие выпускного клапана позволяет увеличить энергию газа, поступающего к турбине компрессора, и тем самым ускорить возрастание давления наддува.

Благодаря электронному управлению впрыском топлива удастся снизить минимальную устойчивую частоту вращения до 10–12 % от номинальной. Это особенно важно для судов с мощными дизелями при прохождении каналов и узкостей.

➤ *Возможность снижения выбросов окислов азота.* В электронной системе управления предусмотрена возможность выбора двух видов режимов работы дизеля: режим оптимального расхода топлива и режим минимальных выбросов NO_x с отработавшими газами. На рис. 4 показано изменение выбросов NO_x , давления топлива перед форсунками и давления газов в цилиндре при смене режимов.

Более чем двухкратное снижение выброса NO_x достигается за счет осуществления двухфазного впрыска топлива, снижения максимального давления и температуры рабочего цикла. Естественно, это приводит к увеличению удельного расхода топлива, но режим малых выбросов NO_x используется только в ограниченных акваториях.

Возможное снижение надежности дизеля в целом связано с надежностью управляющих клапанов, надежностью силового гидравлического агрегата, надежностью электронных компонентов системы управления, а также с отработкой производителем программного обеспечения системы. Как уже отмечалось, изготовителем обеспечено полное резервирование компонентов системы управления, отказ которых приводит к остановке

дизеля. Компоненты, отвечающие за работу отдельных цилиндров, могут быть заменены запасными без остановки дизеля.

Фирма «Mitsubishi Heavy Industries Ltd.» (MHI) закончила разработку дизелей типа UEC33LSII-Eco, UEC50LSII-Eco и UEC60LSII-Eco с электронным управлением. В дальнейшем фирма предполагает распространить концепцию электронного управления на двигатели с большим диаметром цилиндра типа UEC-Eco и серии LSE [9, 11].

Концепция системы управления дизеля типа UEC-Eco та же, что и у дизеля типа ME фирмы MAN B&W, т. е. процессы подачи топлива, открытия и закрытия выпускных и пусковых клапанов, подачи смазки в цилиндры осуществляются гидравлическими толкателями под управлением электронной системы по программам, разработанным производителем.

Главное преимущество электронного управления фирма видит в том, что гибкое управление позволяет на 1–2 % снизить удельный расход топлива на долевых режимах при одинаковых с традиционным дизелем выбросах NO_x или уменьшить на 10–15 % выбросы NO_x при одинаковом удельном расходе топлива.

Электронное управление позволяет поддерживать нужное давление топлива, что обеспечивает бездымное сгорание на всех режимах, и при этом достигается снижение минимальной устойчивой частоты вращения.

В приводе выпускного клапана сохранена традиционная схема гидравлического привода за исключением того, что перемещение нижнего толкателя осуществляется не под воздействием кулака, а давлением сервомасла, управляемого электромагнитным клапаном. Благодаря этому фазы открытия выпускного клапана могут быть оптимизированы для всех нагрузочных режимов. Оптимизация дает выигрыш в расходе топлива 1–2 % по сравнению с традиционным двигателем.

Фирма «Wartsila NSD» начала разработку электронной системы управления для малооборотных дизелей, использующих тяжелое топливо, с 1993 года. В настоящее время фирма предлагает дизели 6RT-flex58T-B с ЭСУ размерностью цилиндров от 500 до 960 мм [1, 12].

Двигатели типа RT-flex являются развитием хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации дизелей типа RTA. Отличие заключается в том, что механический привод органов газораспределения заменен гидравлическим приводом с электронным управлением клапанами. Фирма анонсирует фактически те же преимущества новой системы управления, что и описанные выше преимущества дизелей типа ME фирмы MAN B&W.

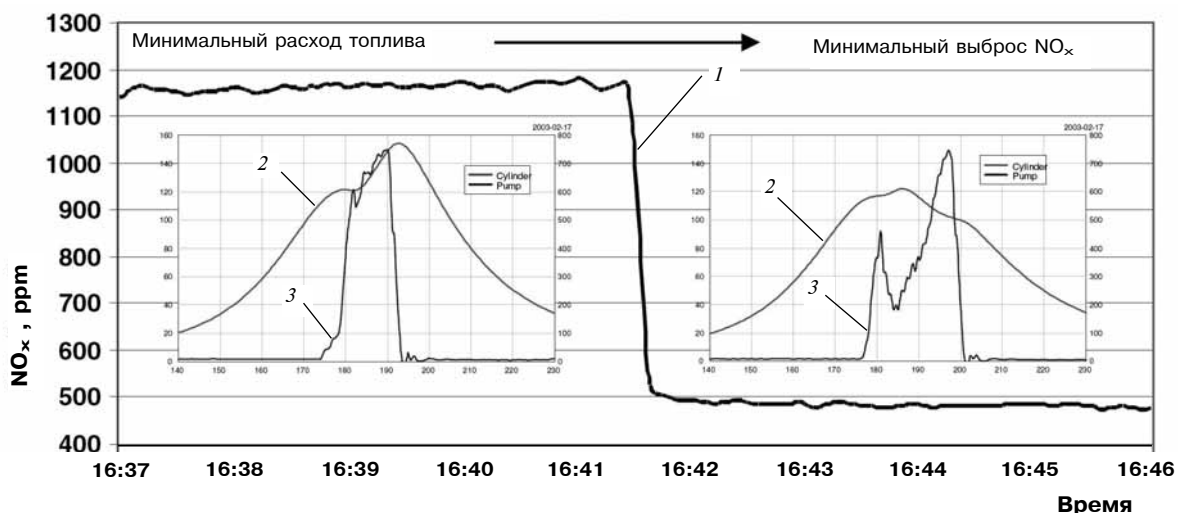


Рис. 4. Переход дизеля с режима минимального расхода топлива на режим минимальных выбросов NO_x с отработавшими газами при нагрузке дизеля 75%:

1 — изменение выбросов NO_x ; *2* — давления топлива перед форсунками; *3* — давления газов в цилиндре

Главное отличие дизелей RT-flex от дизелей типа ME и UEC Eco состоит в разных системах впрыска топлива в цилиндры. Если в дизелях ME топливо к форсункам подается индивидуальными для каждого цилиндра топливными насосами высокого давления с гидравлическим приводом, то в дизелях RT-flex имеется общий коллектор (Common-Rail, далее — CR), топливо в который подается общим для всех цилиндров плунжерным насосом с проводом от коленчатого вала. Топливо давлением до 1000 бар из общего коллектора поступает к форсункам традиционного типа через электромагнитные клапаны с электронным управлением. Система управления клапанами позволяет регулировать количество подаваемого в цилиндр топлива, угол начала подачи и форму кривой давления топлива перед форсункой, включая двухфазный впрыск топлива. В крышке цилиндра расположены три форсунки, и система управления позволяет регулировать подачу топлива через каждую из них, что дает возможность снизить минимальную устойчивую частоту вращения дизеля за счет отключения одной или двух форсунок при чрезвычайно малой цикловой подаче топлива. В топливном коллекторе предусмотрены демпферы для гашения волн давления, возникающих при циклической подаче топлива. Схема системы управления подачей топлива в цилиндры, открытием выпускных клапанов и пусковых клапанов показана на рис. 5.

Плунжерные насосы высокого давления приводятся в действие кулачковым валом, связанным с коленчатым валом шестеренной передачей. Насосы сервомасла приводятся от этого же вала. Все насосы дублированы.

Для подготовки дизеля к пуску предусмотрены насосы с электрическим приводом. Топливо к

насосам подается в подогретом виде, при остановленном двигателе предусмотрена автоматическая периодическая прокачка топливной системы.

Управление выпускными клапанами производится по традиционной схеме, за исключением того, что распределительный привод силового поршня заменен гидравлическим. Подача масла к силовому поршню давлением 200 бар осуществляется через клапан, управляемый ЭСУ. Взамен воздухораспределителя с механическим приводом на каждом цилиндре установлен клапан для подачи воздуха в управляющую полость пускового клапана, который действует в соответствии с программой, заложенной в ЭСУ.

Функции управления распределительными органами дизеля выполняет электронное устройство WECS-9500 (Wartsila Engine Control System), расположенное на дизеле вблизи местного поста управления. Устройство имеет модульную конструкцию и содержит отдельные для каждого цилиндра микропроцессорные блоки управления, также дублированный блок для управления дизелем в целом и для связи с более высокими уровнями управления — центральным постом управления и ходовым мостиком. Функции устройства WECS-9500: управление впрыском топлива, управление выпускными клапанами, пуск и реверс дизеля. Система управления включает в себя систему дистанционного управления, электронную систему регулирования частоты вращения с ограничением подачи топлива в зависимости от частоты вращения и давления наддува для предотвращения перегрузки дизеля, система аварийно-предупредительной сигнализации и защиты. Последняя — DENIS-9 (Diesel Engine Control and Optimizing Specifica-

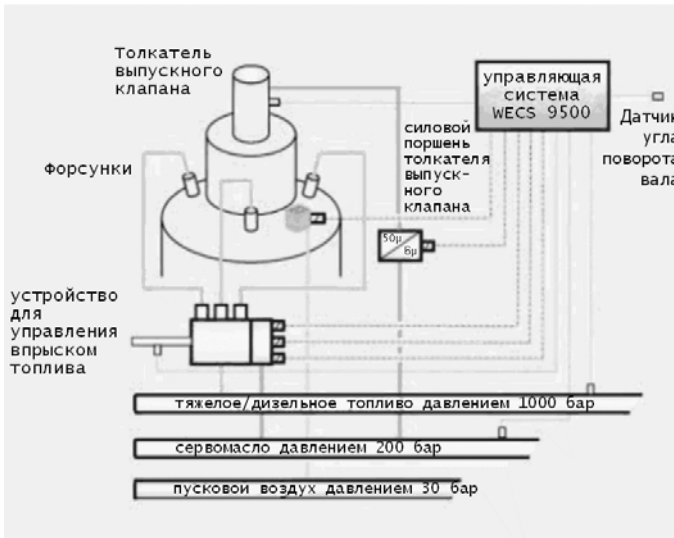


Рис. 5. Схема управления регулирующими органами дизеля типа RT-flex

tion), которая помимо обычных функций берет на себя дополнительные: сигнализация или защита по давлению силового масла, отказу масляного фильтра, утечкам силового масла, утечкам топлива в системе CR, вязкости, давлению и температуре топлива на входе в систему CR, давлению газов в цилиндрах, неисправностям в системе управления частотой вращения, неисправностям и отказам в системе WECS-9500.

Дальнейшее развитие своих дизелей фирма видит в создании «интеллектуального» дизеля (Intelligent Engine). Идея заключается в том, что путем мониторинга различных параметров дизеля с использованием бортовых компьютеров контролируется его техническое состояние, и на этой базе корректируются регулировки, планируется техническое обслуживание и заказ запасных частей.

Таким образом, применительно к судовым малооборотным дизелям с электронной системой управления можно выделить особенности, присущие дизелям этого типа:

- наличие развитых гидравлических систем (масло, топливо), включающих в себя силовые насосы, трубопроводы (коллекторы) высокого давления, гидравлические толкатели и распределительные клапаны с электрическим управлением;
- наличие микропроцессорных электронных блоков, вырабатывающих электрические управляющие сигналы на базе программного обеспечения, разрабатываемого проектантом дизеля;
- наличие специальных датчиков, вырабатывающих электрические сигналы, необходимые для функционирования управляющих микропроцессорных блоков: датчики угла поворота

коленчатого вала и датчики обратной связи с исполнительными гидравлическими устройствами;

- наличие устройств, обеспечивающих связь оператора с системой электронного управления, или, другими словами, наличие специального пульта управления, позволяющего выбирать оптимальный для конкретных условий режим работы дизеля; это может быть, например, режим наибольшей экономичности или режим минимального выброса с отработавшими газами в атмосферу окислов азота;

- отсутствие механического привода органов газораспределения и топливоподачи, что предъявляет повышенные требования к надежности элементов системы управления.

Литература

1. Аннотации докладов, представленных на 23 конгресс CIMAC (Гамбург, 2001 г.), Schiff und Hafen, 2001, No.3 — K. Aerberli, N. Mikulicic. The Sulzer RTA-low speed engine range: today and in the future, - P. Sorensen. The intelligent engine - design status and service experience, — S. Frankhauser, K. Heim. The Sulzer RT-flex — launching the era of common-rail for low speed engines, — The MC engines and their future development.
2. The intelligent, unmanned ship can be realized. HANSA — 134 Jahrgang — 1997 — Nr.
3. *Обозов А.А.* «Интеллектуальный двигатель» производства ОАО «Брянский машиностроительный завод» — взгляд в будущее // Двигателестроение — 2003. — № 4.
4. MAN B&W Presents First ME Engine, Diesel and Gas Turbine Worldwide. 2003, May, P.30—33.
5. Strong interest in MAN B&W ME engines // HANSA, 2003, № 8, P. 50
6. The Electronically Controlled ME Engine. // Публикация фирмы MAN B&W Diesel A/S, Reg. № 39 66 13 14, February 2003, P. 407 — 03.02.
7. The First Commercial ME Engine // Публикация фирмы MAN B&W Diesel A/S, Reg. № 39 66 13 14, May 2003, P. 409 — 05.03.
8. *Nakashima M., Takaishi T., Tayama K., Takasaki K., Nagae Y., Ishida H.* Fundamental Study on Total Electronic Control System for Marine Engines // Bulletin of the M.E.S.J., Vol. 28, № 1, P. 30—36.
9. *Иванов М.Ю., Неелов А.Н., Сорокин В.А., Шишкин В.А.* Состояние и перспективы развития судовых малооборотных дизелей с электронными системами управления // Науч.-техн. Сб. РМРС, СПб. Вып. 28, 2005.
10. *Egeberg C., Knudsen T., Sorensen P.* The electronically controlled ME/ME-C series will lead the two-stroke diesel engine concept into the future // Paper № 82, CIMAC Congress, Kyoto, 2004.
11. *Sakaguchi K., Sugihara M.* Development of electronically controlled engine «Mitsubishi UEC Eco-engine» // Paper № 221, CIMAC Congress, Kyoto, 2004.
12. *Demmerle R., Heim K.* Evolution of the Sulzer RT-flex Common Rail System // Paper № 216, CIMAC Congress, Kyoto, 2004.