

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220

OPERATING FEATURES OF MARINE ENGINES WITH COMMON RAIL FUEL SYSTEM

G.E. Zhivljuk, A.P. Petrov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This paper covers the influence of operating characteristics on the development and improvement of technical shape of modern marine reciprocating internal combustion engines. The paper summarizes the experience of exploitation and repair of storage systems of fuel injection with electronic control. The structure of the system, consisting of primary sensors, an electronic control unit (ECU), electronically-controlled injector, a pressure accumulator of the fuel valves, pumps etc. and the main types of failures that occur in service. Introduced the structuring of failures for mechanical devices, fuel injection systems and electronic control devices. Assess the failures and their consequences from the point of view of influence on parameters of energy efficiency and environmental safety. It is shown that from the point of view of resource indicators, the most vulnerable element of the system is the fuel feed nozzle, and in particular, high-speed electronically-controlled valve. Wear of structural elements of the valve leads to increased consumption control fuel. The wear of the injection pump leads to a drop in pump performance and consequently, as described above, wear of injectors, reduce the pressure in the fuel rail. It becomes apparent that the same symptoms of defects makes the diagnosis of the mentioned problems. Since these defects are associated with mechanical causes, the electronic diagnostics of such faults requires a skilled operator considerable experience in repair and sufficiently high intuition. Analysis of technical materials, the study of experience as the leading manufacturer of marine engines MAN Diesel & Turbo has identified key areas of refinement of the design of fuel supply systems. They provide for the application of the principles of modular construction, redundancy of control loops, valve isolation, the use of new materials, and the increased strength of structural elements under the influence of high mechanical loads. An important role for the acquisition of the engine management system by means of automatic, continuous monitoring of the main parameters of the engine and its systems, providing technical support for the operators in the remote access mode.

Keywords: power plant, diesel engine, accumulator fuel supply system, electronic control, faults, failures, diagnostics, primary sensors, actuators, modular constructions, redundancy.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Operating features of marine engines with common rail fuel system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 201–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220.

УДК 621.43.074

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Настоящая статья освещает вопросы влияния эксплуатационных особенностей на развитие и совершенствование технического облика современных судовых поршневого двигателей внутреннего сгорания. В работе обобщен опыт эксплуатации и ремонта аккумуляторных систем топливоподачи с электронным управлением. Рассмотрена структура системы, включающая первичные датчики, электронный блок управления электронно-управляемые форсунки, аккумулятор давления топлива, клапаны, насосы и другие механизмы, а также основные виды отказов, возникающие в процессе эксплуатации. Введено структурирование отказов по механическим устройствам топливоподающих систем и электронным устройствам управления. Дана оценка отказов и их последствий с точки зрения влияния на параметры энергетической эффективности и экологической безопасности. Показано, что с точки зрения ресурсных показателей наи-

более уязвимым элементом системы является топливоподающая форсунка, и, в частности, быстродействующий электронно-управляемый клапан. Износ конструктивных элементов клапана приводит к повышенному расходу управляющего топлива. Износ топливного насоса высокого давления приводит к падению его производительности и, следовательно, как и износ форсунок, к понижению давления в топливной рампе. Становится очевидным, что одинаковые внешние проявления дефектов крайне затрудняют диагностирование указанных неисправностей. Поскольку эти дефекты связаны с механическими причинами, электронное диагностирование таких неисправностей требует от квалифицированного оператора значительного опыта в ремонте и достаточно высокой интуиции. Отмечается, что анализ технических материалов и изучение опыта разработок ведущего производителя судовых двигателей MAN Diesel & Turbo позволили выявить основные направления доводки конструкции систем топливоподачи, предусматривающие применение принципов их модульного построения, резервирование контуров управления, клапанной развязки, применение новых материалов, увеличение прочности элементов конструкций под воздействием повышенных механических нагрузок. Важную роль призвано играть комплектование системы управления двигателем средствами автоматического непрерывного мониторинга основных параметров работы двигателя и его систем, а также обеспечение технической поддержки эксплуатационников в режиме удаленного доступа.

Ключевые слова: энергетическая установка, дизельный двигатель, аккумуляторная система топливоподачи, электронное управление, неисправности, отказы, диагностирование, первичные датчики, исполнительные устройства, модульные конструкции, резервирование.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Эксплуатационные особенности систем топливоподачи *Common Rail* судовых двигателей / Г.Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 201–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220.

Введение (Introduction)

Развитие двигателестроения обусловлено ужесточением экологических норм и требований экономичности, предъявляемых к судовым двигателям внутреннего сгорания (ДВС). Эти требования вступают в существенное противоречие друг с другом, побуждая исследователей и конструкторов к поиску оптимальных решений при налагаемых ограничениях. Свидетельством этой тенденции является не только дальнейшее ужесточение стандартов выбросов вредных веществ во всем мире, но и создание зон экологической безопасности, имплементация которых обеспечивается прежде всего достижением полного сгорания, что, в свою очередь, обеспечивает низкое содержание вредных веществ в выбросах, экономичность и долговечность конструкций.

Соблюдение существующих и предстоящих норм выбросов с наилучшим возможным расходом топлива становится все более важным фактором успеха судовых ДВС. Особое внимание уделяется работе с низкой нагрузкой на малых частотах вращения. Традиционный впрыск топлива в этом случае является недостаточным для достижения требуемого результата, поскольку процесс впрыска, контролируемый распределительным валом, связан с частотой вращения двигателя. Таким образом, возможности для обеспечения независимого от нагрузки подхода к процессу сгорания очень ограничены.

Проблемы в развитии конструкций и достижении высоких технико-экономических показателей современных дизельных энергетических установок (ДЭУ) решаются благодаря электронному управлению [1], [2] происходящими в них процессами. Процесс топливоподачи наряду с газораспределением в наибольшей степени определяет эффективность работы дизельного двигателя, фиксируя характер протекания тепловыделения в цилиндре двигателя и тем самым эффективность его работы. Возможности управления этими процессами расширяются благодаря интеграции интеллектуальных микропроцессорных систем управления и аккумуляторных систем топливоподачи *Common Rail* двигателей (CRDI). Их возможности, помимо точнейшего формирования законов управления при периодических процессах, позволяют применить адаптацию (самонастройку) систем к случайным воздействиям, обеспечить их самодиагностикой, снабдив элементами FMEA — Failure Mode and Effects Analysis — элементами анализа видов отказов и их последствий.

Современная система включает следующие устройства: первичные датчики (давления, температуры, расхода, положения коленчатого и распределительного валов, частоты и вращения, кон-

троля экологических параметров), электронный блок управления (ЭБУ), электронно-управляемые форсунки, аккумулятор давления топлива (топливная рампа), клапаны, насосы и др. Множество элементов управления иллюстрирует обобщенная блок-схема системы CRDI для легкого топлива, представленная на рис. 1 [3].

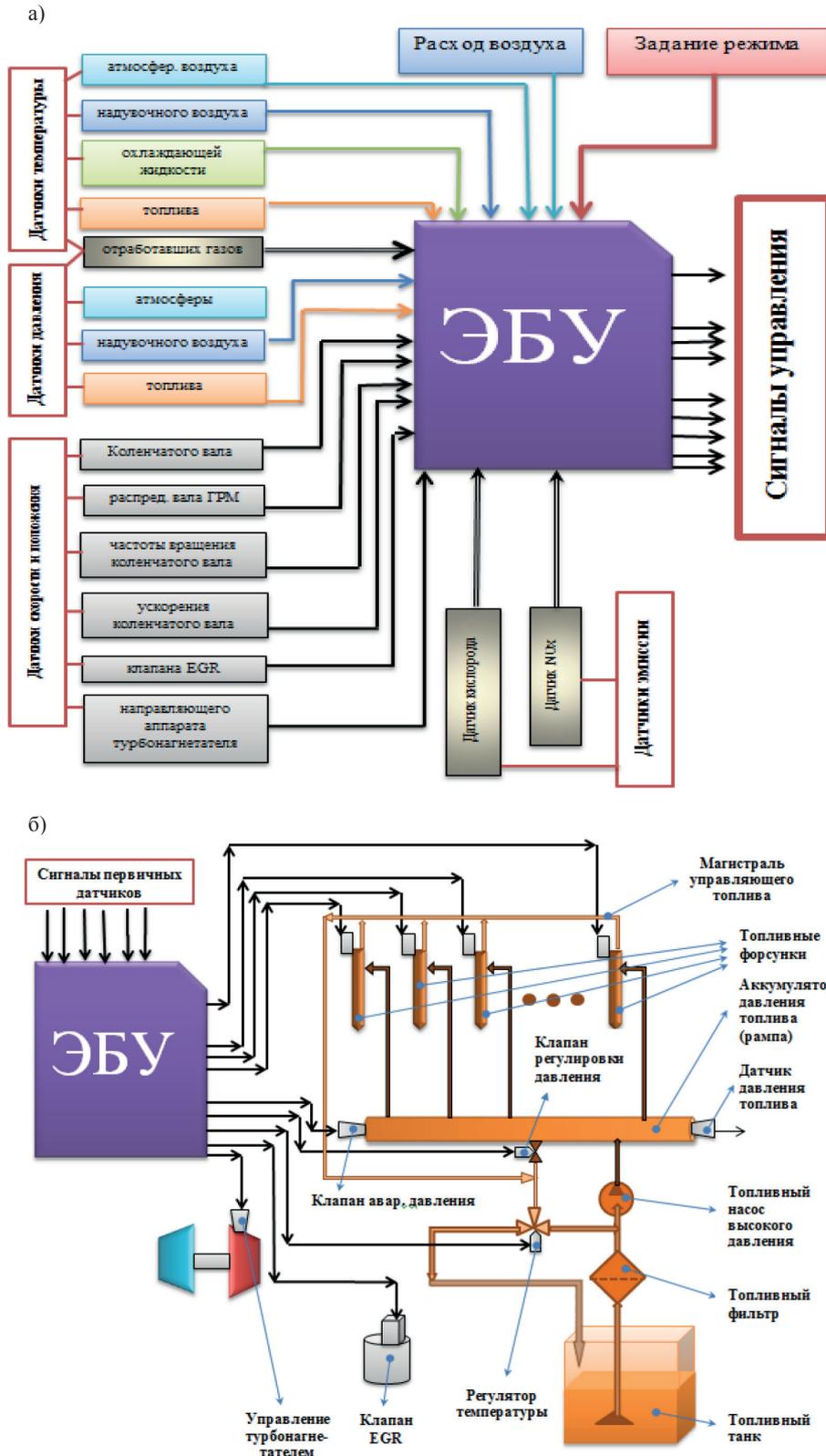


Рис. 1. Система топливоподачи Common RAIL:

- а — подсистема сбора и обработки информации первичных датчиков;
- б — подсистема электронного управления топливоподачей CRDI

Судовые ДЭУ в значительной степени усваивают опыт береговых установок с системами CRDI. Фирма «Robert Bosch GmbH» с учетом опыта создания, производства и эксплуатации CRDI для двигателей автотранспортного назначения разработала и внедрила целое семейство систем CRDI для судовых дизелей с цилиндровой мощностью до 350 кВт [4], [5]. Данные системы обладают следующими преимуществами, благодаря которым они занимают заслуженное место на рынке этой продукции.

Во-первых, рассматриваемые системы подачи топлива позволяют решить поставленные перед объектами управления задачи путем формирования требуемого для конкретных условий и режима работы двигателя закон подачи топлива, в том числе за счет разделения функций создания давления и времени впрыска.

Во-вторых, применение в топливной форсунке быстродействующего топливного клапана с гидравлической разгрузкой позволяет производить дискретный (дробный) впрыск топлива [5] – [7] разделением подачи топлива в одном цикле топливной форсунки на несколько впрысков следующим образом:

– за счет предварительного впрыска с возможностью реализации практически любого фактора динамичности цикла;

– за счет управляемого дробления основной порции топлива, т. е. требуемых соотношений порций топлива, выделяющих тепло в процессе кинетического и диффузионного сгорания.

В качестве примера на рис. 2 представлена реальная осциллограмма сигнала датчика положения коленчатого вала и управляющего сигнала открытия форсунки на режиме минимальных нагрузок высокооборотного малоразмерного дизельного двигателя «Митсубиси». Из приведенной осциллограммы следует, что закон подачи топлива высокооборотного малоразмерного двигателя для режима, близкого к холостому ходу, формируется тремя импульсами управляющего сигнала форсунки.

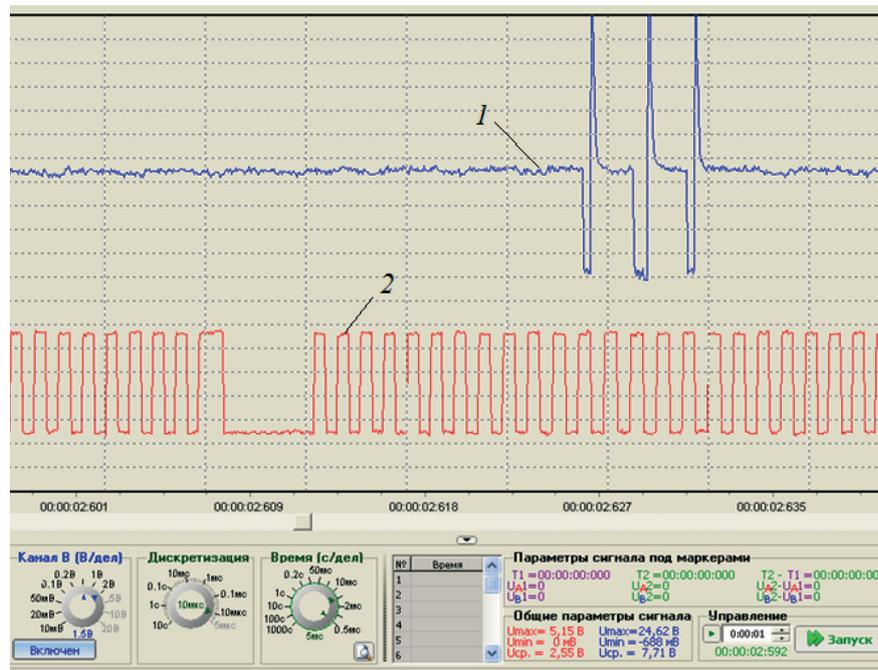


Рис. 2. Осциллограмма сигнала датчика положения коленчатого вала и управляющего сигнала открытия форсунки на режиме минимальных нагрузок:
1 — управляющий сигнал форсунки; 2 — сигнал датчика положения коленчатого вала

В результате решается такая важная задача, как выравнивание измеренных ускорений вращения коленчатого вала двигателя, возникающих от набегающего крутящего момента каждого цилиндра за счет корректировки цикловой подачи. Таким образом, обеспечивается равномерность распределения нагрузки по цилиндрам двигателя на всех режимах работы двигателя и равномерность вращения коленчатого вала [8].

В-третьих, использование датчиков, устанавливаемых в системе выпуска отработавших газов для анализа их состава, дает возможность обеспечения требуемых на данном этапе экологических характеристик двигателя за счет эффективного влияния на протекание внутрицилиндровых процессов и использования специальных устройств очистки в системе выпуска.

В-четвертых, ЭБУ обладает возможностью самодиагностики системы, направленной на предупреждение возможных отказов в эксплуатации, оповещение оператора и принятия мер по ограничению последствий аварии (Slow Down).

Наконец, алгоритм управления системой CRDI позволяет соблюдать основной принцип алгоритмов создания в виде возможности развития путем перенастройки режимов работы установки и корректировки программного обеспечения ЭБУ.

Эксплуатация оборудования *Common Rail* является самым строгим видом контроля правильности усилий научных работников, конструкторов, производителей и самих пользователей. При этом выявлен ряд следующих недостатков:

- высокая стоимость комплектующих элементов системы, ремонта и обслуживания;
- ограниченные ресурсные показатели;
- необходимость периодического обслуживания системы высококвалифицированным персоналом, выполняющим как механическое обслуживание, так и распознавание ошибок и параметров работы электронных элементов системы;
- высокая требовательность системы к используемому топливу в плане топливоподготовки, его физико-химических характеристик, в особенности к цетановому числу;
- диагностирование и ремонт требуют не только вмешательства специально подготовленного высококвалифицированного персонала, но и наличия весьма специфичного и дорогостоящего оборудования и программного обеспечения.

В предлагаемой публикации авторами на основе собственного опыта и дополнительной информации ремонтных фирм обобщены данные по эксплуатации и ремонту современных ДВС, оборудованных системой CRDI. Рассмотрены и систематизированы основные виды отказов системы CRDI, вызванных как механическими неисправностями топливоподающих устройств, так и потерями работоспособности электронного оборудования системы управления. На примере разработок ведущего производителя судовых и стационарных двигателей MAN Diesel & Turbo показаны пути совершенствования принципиальной схемы компоновки системы топливоподдачи, обусловленные эксплуатационными особенностями.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыт эксплуатации

Наличие большого числа комплектующих системы обуславливает высокую сложность диагностирования и устранения неисправностей. При этом необходимо разграничивать отказы электронных подсистем, которые выявляются ЭБУ и выдаются в виде протокола ошибок и механических, вызванных в основном износами деталей оборудования в составе системы. Очевидно, что последние влияют и на параметры системы, подлежащие контролю ЭБУ, поэтому точная идентификация такого рода ошибок представляет достаточно большую сложность. В целом распределение механических дефектов и неисправностей электронного оборудования системы распределяется приблизительно поровну (рис. 3).

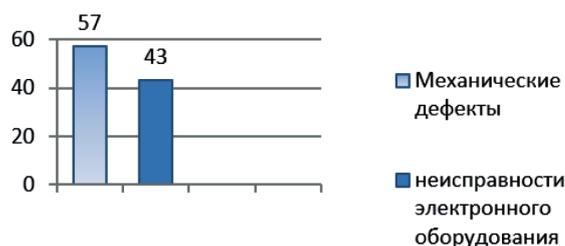


Рис. 3. Распределение отказов системы *Common Rail*

Основные механические дефекты системы

Как и в традиционной системе топливоподачи, наиболее уязвимыми конструктивными элементами системы CRDI являются форсунка и топливный насос высокого давления. Распределение неисправностей показано на рис. 4.

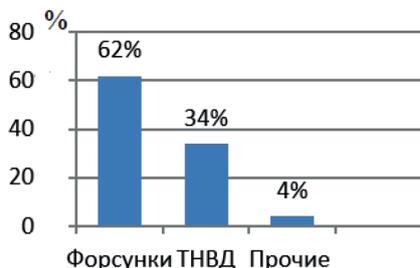


Рис. 4. Распределение механических неисправностей, возникающих в системе *Common Rail*

Опыт эксплуатации двигателей, оснащенных системой CRDI, свидетельствует о том, что с точки зрения ресурсных показателей наиболее уязвимым элементом системы является топливоподающая форсунка, и, в частности, быстродействующий электронно-управляемый клапан. Износ конструктивных элементов клапана приводит к повышенному расходу управляющего топлива. В конечном итоге, повышенный расход управляющего топлива после суммирования с расходом утечного топлива, проникающего через прецизионные узлы форсунки (игла распылителя, управляющий поршень), неизбежно приводит к падению давления в топливной рампе. Для поддержания требуемого давления в рампе (с целью обеспечения параметров топливоподачи) необходимо увеличение производительности топливного насоса высокого давления (ТНВД), которое может быть достигнуто путем изменения времени открытия управляющего клапана давления топлива. В результате электронная система диагностирует искаженную скважность прохождения импульсов управляющего сигнала клапана и идентифицирует ее как ошибку системы, выдавая сигнал оповещения о неисправности.

Кроме того, необходимо отметить, что увеличение расхода управляющего топлива может быть также связано с полным выходом из строя управляющего клапана одной форсунки. В данном случае производится увеличенная подача топлива в цилиндр, способная спровоцировать резкое неконтролируемое увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя (разнос двигателя) или чрезмерную перегрузку данного цилиндра. В этой связи электронный блок управления двигателя рассматривает такую ошибку как фатальную и вводит запрет на дальнейшую эксплуатацию двигателя. Характерный вид износа узла быстродействующего клапана представлен на рис. 5.



Рис. 5. Характерный вид износа седла клапана форсунки (микросъемка)

Следующим по распространенности дефектом является выход из строя топливного насоса высокого давления. Будучи тяжело нагруженным агрегатом, ТНВД склонен к повышенным износам, возникающим в его основных деталях. Дефекты ТНВД, возникающие в процессе эксплуатации, зачастую бывают связаны с низким качеством топлива или плохой топливоподготовкой. В основном это относится к повышенному износу узлов топливоподкачивающей секции, если она конструктивно объединена с ТНВД, и к потере герметичности клапанов насоса. Очень часто продукты износа топливного насоса высокого давления приводят к выходу из строя форсунок системы ввиду попадания продуктов износа в проточные части и зазоры прецизионных пар конструктивных элементов форсунок. На практике такие разрушения можно выявить визуально, поскольку продукты износа можно рассмотреть в топливе перед форсунками в виде мельчайших фрагментов с характерным металлическим блеском.

Износ ТНВД выражается в падении производительности насоса и, следовательно, как и ранее описанный износ форсунок, в понижении давления в топливной рампе. Очевидно, что одинаковые внешние проявления дефектов крайне затрудняют диагностирование указанных неисправностей. Принимая во внимание тот факт, что эти дефекты связаны с механическими причинами, электронное диагностирование таких неисправностей требует от квалифицированного оператора значительного опыта в проведении ремонта и достаточно высокой профессиональной проницательности. Наиболее распространенным способом диагностики неисправности форсунок системы *Common Rail* является измерение расхода управляющего топлива и сопоставление его с расходом управляющего топлива эталонной форсункой в характерном режиме настройки.

Оставшаяся часть механических дефектов систем CRDI, отнесенная к прочим, характерна не только для рассматриваемой системы топливоподдачи, но и для всех известных систем более ранних поколений. К ним следует отнести следующие: потерю работоспособности конструкции уплотнений трубок высокого давления; разрушение элементов привода ТНВД; износ распылителей форсунок; потерю герметичности топливных магистралей низкого давления и др. Как правило, в большинстве случаев эти дефекты обусловлены неквалифицированными действиями ремонтного или обслуживающего персонала.

Кроме того, необходимо отметить, что сложная геометрия трубопроводов, каналов, соединений и переходов системы CRDI при высоком давлении создает предпосылки для усталостного разрушения [9], [10]. Для повышения предельного давления в полых толстостенных оболочках, которыми насыщена система CRDI, на практике используется так называемое *автофреттирование*. Его технология заключается в том, что полая толстостенная оболочка нагружается давлением, при котором возникает область пластической деформации. После снятия нагрузки в оболочке возникает поле остаточных напряжений. Если оболочку вновь нагрузить, то предельное давление, соответствующее появлению пластических деформаций, повысится.

Решение проблем повышения износостойкости отдельных тяжело нагруженных элементов системы, в частности узла быстродействующего клапана управления подачей топлива, возможно благодаря использованию специальных неметаллических материалов на основе безоксидной керамики [8]. Вместе с тем изучение механики разрушения и усталостной прочности системы связано с рядом проблем. Некоторые из них в части трещинообразования необходимо решить в ближайшем будущем.

Неисправности электронного оборудования

Рассматривая вопросы неисправностей, связанных с дефектами электронного оборудования, необходимо принять во внимание условия работы электронных элементов системы (датчиков и исполнительных устройств), расположенных на двигателе. Элементы системы, размещаемые на двигателе, подвержены воздействию агрессивных сред (масло, топливо, охлаждающие жидкости), высоких температур и, что немаловажно, высоких уровней вибрации. Совокупность этих

факторов и является основной причиной выхода их из строя. Так, вибрации вызывают разрушение изоляции и возникновение замыканий в датчиках, воздействие высоких температур приводит к потере работоспособности уплотнений разъемов датчиков к линиям связи с электронным блоком управления, а воздействие агрессивных сред влечет за собой не только нарушение контактов в подключениях, но и разрушение материалов, из которых изготавливаются изоляционные покрытия проводов и сами электрические разъемы (рис. 6).



Рис. 6. Разрушение разъема под действием высокотемпературных агрессивных сред

Похожие дефекты имели место в распределительных коробках в результате касания и истирания изоляции проводов о внутренние поверхности коробки, а также нарушения изоляции из-за вибрации в уплотнительных элементах подвода (отвода) проводов. Кроме того, прохождение высокочастотных сигналов может быть связано с образованием наводок в линиях, поэтому производителями систем предпринимаются меры по экранированию проводов критических линий связи.

Наибольшая доля отказов электронного оборудования (72 %) приходится на измерительную (датчики) и исполнительную (исполнительные устройства) части системы управления. Более уязвимой частью ЭБУ являются периферийные «силовые ключи», выход из строя которых обусловлен формированием и прохождением мощных сигналов, управляющих исполнительными устройствами. Значительная часть неисправностей (21 %) приходится на каналы связи, включая разъемы. Среди прочих (7 %) наиболее редкими представляются сбои в работе ЭБУ. В первую очередь, это связано с относительно простым программным обеспечением системы, обладающим высокой степенью надежности. Однако попытки неквалифицированного вмешательства в программное обеспечение с целью изменения параметров настройки двигателя приводят к отказам в работе или некорректному формированию отдельных управляющих сигналов. Несмотря на значительное многообразие дефектов электронных систем, возникшие неисправности достаточно точно могут быть идентифицированы путем «чтения» накопленных ошибок из памяти ЭБУ специальными ремонтно-диагностическими устройствами — сканерами.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение наиболее часто встречающихся дефектов электронных систем, к которым следует отнести неисправности первичных датчиков и исполнительных устройств, размещенных на двигателе и в его системах (рис. 7). Наиболее уязвимыми, как показывает практика, оказываются датчики и управляющие клапаны системы высокого давления, в том числе клапаны предельного давления (если система оборудована таковыми). Достаточно часто возникновение неисправностей обнаруживается в исполнительных механизмах систем рециркуляции отработавших газов (клапаны EGR) и систем управления направляющим аппаратом турбины турбокомпрессора. При этом необходимо уточнить, что эти неисправности могут быть отнесены к дефектам электронных систем лишь частично, поскольку первоисточником их в большинстве случаев служат механические причины.

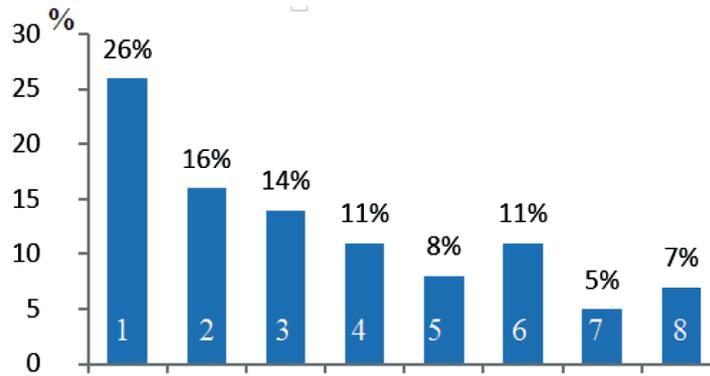


Рис. 7. Неисправности первичных датчиков и исполнительных устройств:
 1 — клапаны и датчики управления; 2 — расходомер воздуха; 3 — клапан EGR;
 4 — механизм управления; 5 — датчики положения и частоты вращения; 6 — датчики контроля;
 7 — устройства управления; 8 — прочие устройства

Среди неисправностей первичных датчиков, в первую очередь, необходимо отметить относительно высокую частоту выхода из строя датчика расхода воздуха. Это первично выражается в искажении показаний и, в конечном итоге, приводит к полной потере работоспособности. Далее по порядку следуют неисправности датчиков положения и скорости коленчатого и распределительных валов. Это отмечается вне зависимости от конструкции (датчик Холла, индуктивный датчик) как по причине разрушения обмоток, так и по причине выхода из строя преобразователей сигнала.

В отдельную группу неисправностей на диаграмме (см. рис. 7) вынесены датчики обеспечения экологической безопасности силовой установки. К ней относятся датчики температуры отработавших газов, датчики дифференциального давления сажевого фильтра, датчики NO_x и связанные с ними устройства регулирования подачи мочевины в систему селективной каталитической очистки отработавших газов и др. Выход из строя этих датчиков, в первую очередь, связан со специфическими условиями их работы, выраженными в высоких значениях температуры окружающих агрессивных сред, высокой скорости и импульсивности потоков измеряемых сред и т. д.

В современных системах CRDI применяются два основных вида исполнительных устройств электронного управления клапаном форсунки, основанных на использовании электромагнитов и пьезокристаллов. Первое поколение форсунок с электромагнитными клапанами обеспечивало высокую работоспособность системы, поэтому отказы электромагнитов были чрезвычайно редкими. При этом основным существенным недостатком такой конструкции являлось недостаточное быстродействие клапана. Данный недостаток первых поколений форсунок успешно решает использование в конструкции пьезоэффекта. Применение пьезокристаллов в качестве силового управляющего звена позволяет существенно повысить быстродействие клапана форсунки и открывает более широкие возможности по управлению топливоподачей. При этом необходимо отметить, что пьезокристалл не отличается длительной работоспособностью и вызывает отказы в работе форсунок данного типа.

Особенности совершенствования принципиальной схемы компоновки системы

В ряде случаев существующий эксплуатационный опыт вызывает необходимость помимо подетального подхода к доводке конструкции любой системы рассмотреть возможности самой системы с точки зрения её эффективности, надежности и подверженности дальнейшей модернизации.

Обратимся к опыту фирмы MAN Diesel & Turbo [7] и оценим её шаги по совершенствованию архитектуры системы CRDI, которая спроектирована для работы на тяжелом топливе HFO. В дополнение к высокой вязкости это топливо также обычно имеет высокое содержание

абразивных частиц и очень агрессивных химических компонентов. Система впрыска должна выдерживать эти условия безотказным способом, включая запуск и останов двигателя во время его работы на НФО.

Специфические условия эксплуатации судовых дизелей вступают в коренное противоречие с концепцией общего аккумулятора давления — топливной рампой, получившей широкое распространение в конструкции системы малоразмерных двигателей, работающих на легком дизельном топливе. Противоречия относятся как к общетеоретическим, конструкционным, технологическим, так и к логистическим аспектам эксплуатации системы CRDI на крупных судовых ДВС. Так, различные виды топлива, которые должен использовать двигатель, определяют широкий температурный диапазон по топливу: $-25 \dots 150$ °С. Это, в свою очередь, вызывает существенное различие в линейном тепловом расширении общей рампы, создавая высокие термические напряжения в конструкции, которые суммируясь с механическими напряжениями от давления топлива, способны превысить предел прочности материала. Одновременно длинная рампа конструктивно нуждается в соединениях с каждым цилиндром. В этом случае неизбежно возникновение и распределение по корпусу дополнительных концентраторов напряжений, существенно снижающих надежность узла и системы в целом.

Крайне важным является также тот факт, что в отличие от массовой программы выпуска малоразмерных двигателей транспортного назначения, производство типоразмерных рядов крупных судовых двигателей потребует в условиях мелкосерийного производства значительных затрат на индивидуальную разработку и доводку конструкции общего аккумулятора для каждой модификации двигателя. Поэтому стоимость системы может оказаться неоправданно высокой.

Рост цилиндровой мощности двигателей при больших цикловых подачах топлива приводит к использованию аккумулятора большого объема. Возникающие при этом проблемы и принимаемые контрмеры приближенно пропорциональны увеличению внутреннего диаметра рампы.

Сохранение объема аккумулятора создает проблемы в достижении стабильных параметров впрыска топлива по цилиндрам, также затруднительно решение основной задачи аккумуляторной системы, направленной на исключение колебаний давления в системе для всех цилиндров двигателя. Кроме того, внедрение аккумулятора чрезмерной длины неизбежно превратит его в объект управления с распределенными параметрами уже с другими особенностями процесса впрыска в удаленные от насоса цилиндры.

Исходя из этого разработчики MAN Diesel & Turbo внедряют концепцию сегментирования, разделяя аккумулятор на несколько блоков подходящего объема и применяют, по крайней мере, два насоса высокого давления для шестицилиндрового двигателя. На основе концепции сегментированных рамп, фирмой MAN Diesel & Turbo разработана модульная система CRDI, применяемая к нескольким типам двигателей [6], [7], [8], [12] — рис. 8. Еще одним преимуществом этой сегментации является повышенная гибкость при адаптации CRDI системы к различным количествам цилиндров, что также является интересным случаем, когда рассматриваются модифицированные конструкции двигателей. Например, семицилиндровый двигатель поставляется с четырьмя блоками, когда три блока рамп снабжают каждые два цилиндра и один цилиндр снабжен индивидуальным блоком рампы. Более компактный дизайн блоков CRDI обеспечивает более эффективное использование доступного пространства на двигателе, что удобно для сборки, а также выявляет преимущества в хранении запасных частей.

Пример сегментирования схемы CRDI по модулям дан на рис. 9. Чтобы гарантировать равномерную подачу топлива, колебания давления в системе должны оставаться на очень низком уровне. Это достигается за счет использования блоков рамп оптимального объема, нескольких (от двух до четырех) насосов высокого давления вместо одного насоса, и распределительного вала с высокоточным профилем и расположением тройного кулачка для оптимального привода. Таким образом, обеспечивается высокий равномерный объем подачи топлива по цилиндрам при одновременном ограничении колебания давления в аккумуляторах.

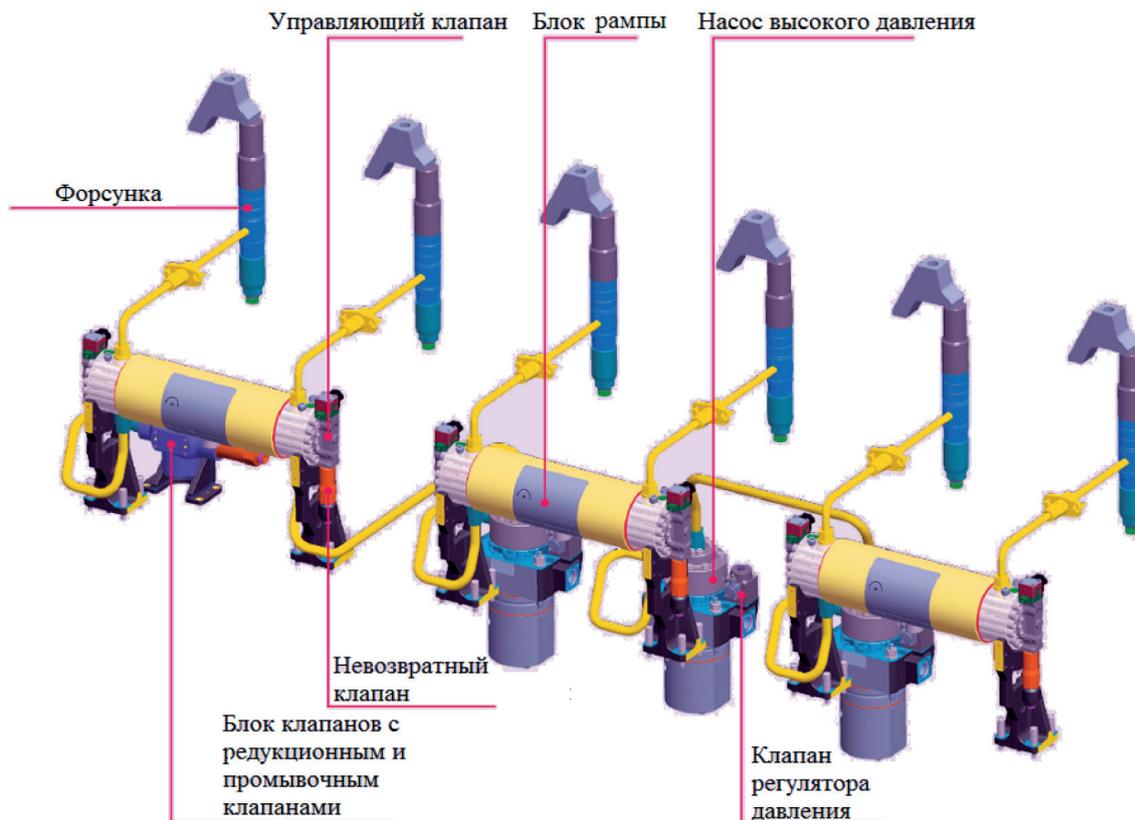


Рис. 8. Система топливоподдачи CRDI двигателя MAN 32/44 CR

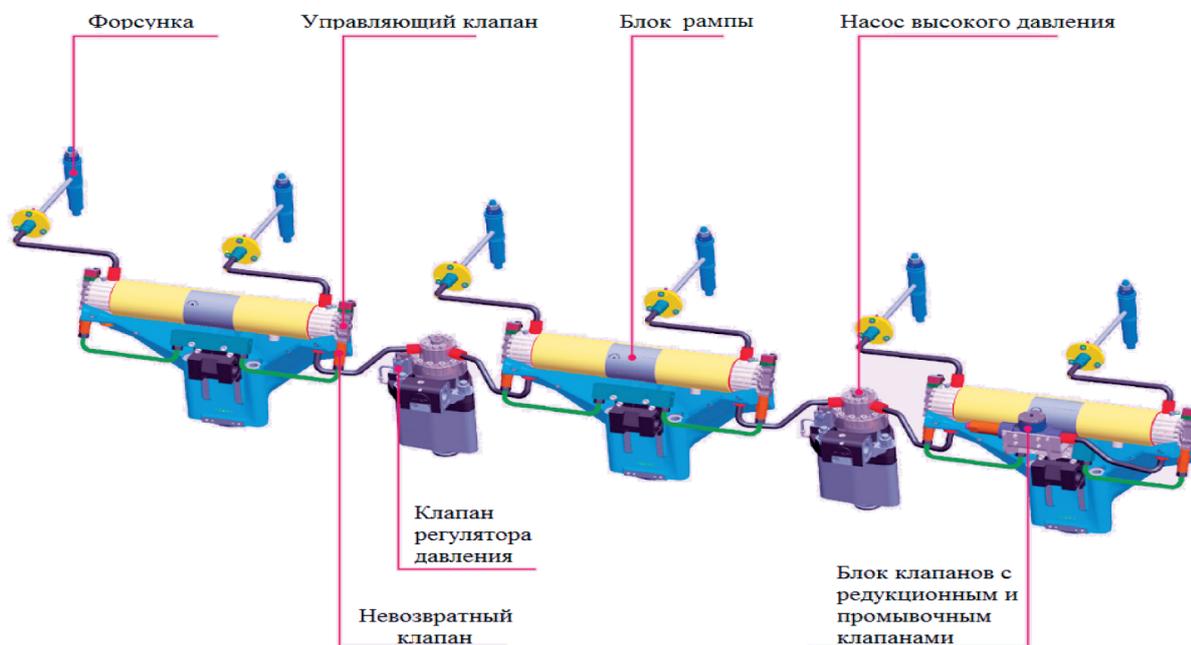


Рис. 9. Система топливоподдачи CR двигателя MAN 48/60 CR

Поддержание заданного давления в рампе производится клапанами регуляторов давления путем дросселирования потока топлива к насосам высокого давления. При этом давление в рампах рассчитывается с помощью характеристической карты в управлении впрыском в зависимости от нагрузки двигателя.

На рис. 10 показана гидравлическая компоновка впрыска мазута в CR для двигателя MAN 32/44CR. Топливо через электромагнитные дроссельные клапана 1 и всасывающие клапана 2 поступает к насосам высокого давления 3, которые снабжают блоки рампы 5 топливом с высоким давлением до 1600 бар посредством нагнетательных клапанов 4. Блоки рампы 5, которые функционируют как аккумуляторы давления и объема топлива, изготовлены из высокопрочной трубы, закрытой торцевыми крышками, в которые встроены управляющий клапан 6. Управляющие клапаны 7 закреплены на его держателе. Соединения для трубы высокого давления расположены в радиальном направлении на держателе управляющего клапана; эти связи подводят топливо к форсункам 8, а также к следующему блоку рампы. Такая конструкция означает, что сама труба блока не требует сверления и поэтому обладает высокой устойчивостью к давлению топлива.

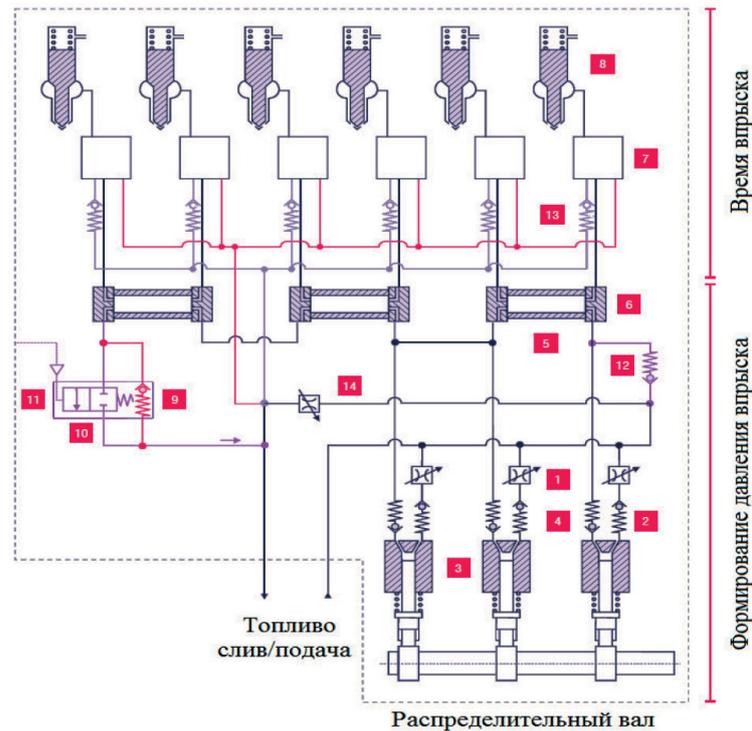


Рис. 10. Схема системы CR для двигателя MAN 32/44 CR

Функциональные утечки топлива, возникающие в процессе контроля 3/2-ходового клапана сбрасываются назад в систему низкого давления через обратный клапан (см. рис. 10 и 11). Обратный клапан 13 (см. рис. 10) также предотвращает обратный поток от низкого давления системы в цилиндр, например, в случае зависания иглы распылителя. Ограничение давления клапаном 9, расположенным на клапане 10, защищает систему высокого давления от перегрузки (см. рис. 10).

Специфически важное значение эксплуатационных особенностей двигателей, работающих на тяжелых топливах HFO, заключается в их пуске и останове. Система подачи тяжелого топлива CRDI снабжена системой предварительного циркуляционного нагрева, которая позволяет остановить и впоследствии запустить двигатель при работе на HFO без перехода на MDO.

Для запуска холодного двигателя на HFO часть элементов системы высокого давления CRDI предварительно подготавливается путем циркуляции предварительно нагретого HFO из системы низкого давления. Для этой цели промывочный клапан 11 (см. рис. 10), расположенный на клапане 10 в торце рампных блоков, снабжен возможностью пневматического управления. При открытии клапана любое остаточное высокое давление в системе уменьшается и топливо проходит через насосы высокого давления 3 к аккумуляторам 5, одновременно нагретое топливо подается через невозвратный клапан 12 (байпас для обеспечения более высокой скорости потока). После прогрева системы топливо сливается в tanks суточного запаса. Кратность циркуляции топлива в режиме

прогрева системы регулируется с помощью дроссельной заслонки клапана 14. В случае аварийной остановки, технического обслуживания или останова двигателя промывочный клапан 11 обеспечивает поддержание минимального давления для всей системы высокого давления.

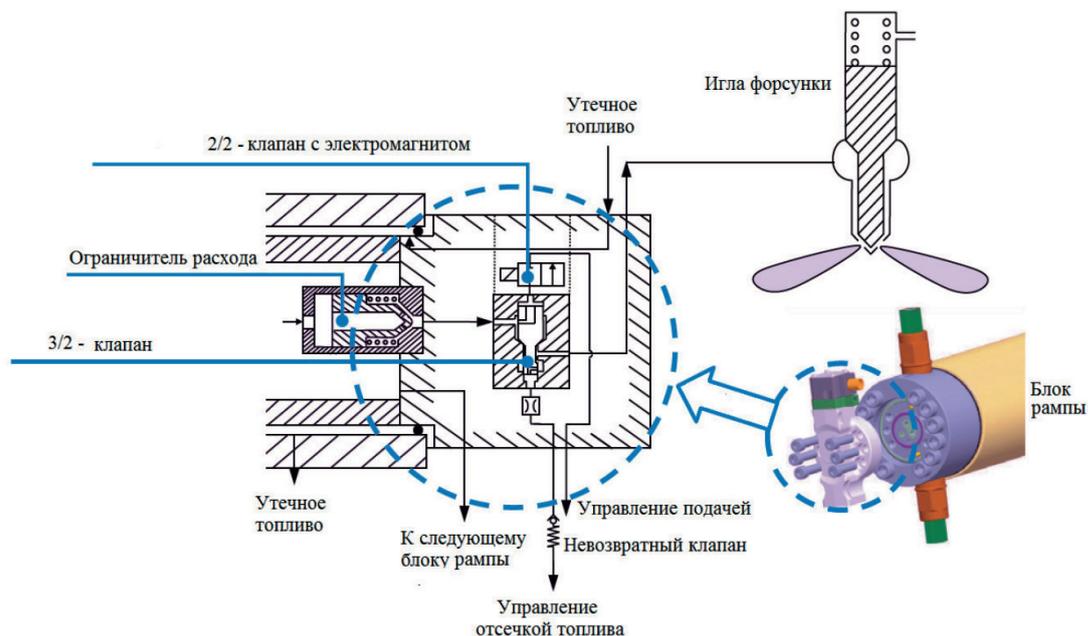


Рис. 11. Компоненты рамного блока для управления количеством и временем подачи топлива

Для оперативного и точного обнаружения возможных утечек топлива в системе высокого давления основные элементы (рампы и трубы высокого давления) снабжены двойными стенками. Пространства между стенками труб связаны между собой и образуют вместе с емкостными датчиками (рис. 12) и установочными винтами (рис. 13) эффективную систему обнаружения утечек.

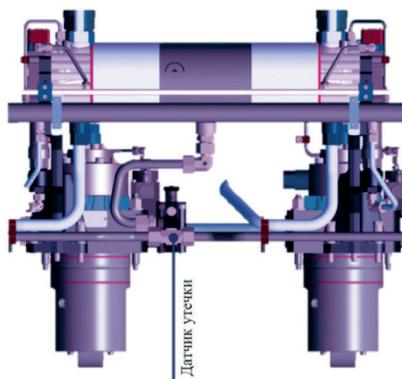


Рис. 12. Система обнаружения утечек (Leakage Detection System — LDS)

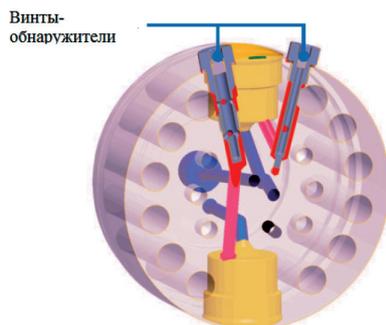


Рис. 13. Система обнаружения утечек: винты-обнаружители / детекторы утечек

Основным преимуществом впрыска в CRDI является гибкость, получаемая путем разделения генерации давления и управления впрыском. Накопленный опыт конструирования и эксплуатации позволяет MAN Diesel & Turbo на основе положительных результатов испытаний осуществлять совершенствование конструкции электронно-управляемых систем впрыска топлива, обеспечивая оптимизацию конструкции, надежность элементов и гармонизацию параметров двигателя. Так, например, в системе CRDI последнего поколения нет отдельной схемы сервопривода для привода клапанов впрыска. Схема подачи топлива через клапаны высокого давления и управляющие клапаны интегрирована в рампные блоки вдали от нагретых головок цилиндров, в результате чего обеспечивается большая надежность системы в процессе эксплуатации.

Различные типы двигателей MAN Diesel & Turbo используют схожую конструкцию системы CRDI. Например, одни и те же базовые конструкции 2/2- и 3/2-ходовых клапанов используются для всех вариантов морского исполнения, а MAN 32 / 44CR выпускается и для стационарных установок (рис. 14). В результате использования 3/2-ходовых клапанов впрыскивающие клапаны находятся под давлением только во время впрыска. Это позволяет избежать неконтролируемого впрыска, даже если управляющий клапан или клапан впрыска подтекают.



Рис. 14. Система *Common Rail* на двигателе MAN V32/44CR

Высокая точность изготовления компонентов системы CRDI обуславливает повышенные требования к дисперсности фильтрации топлива. В целях предотвращения преждевременных отказов, вызванных повреждениями деталей системы твердыми частицами, содержащимися в топливе, в сети низкого давления дополнительно устанавливается 10-мкм автоматический фильтр мазута HFO, который уменьшает износ и стабилизирует срок службы компонентов CRDI (рис. 15).



Рис. 15. Дополнительный 10-мкм автоматический фильтр в бустерном контуре системы подачи мазута HFO

Двигатели, оснащенные технологией CRDI, и, следовательно, имеющие оптимизированный процесс сгорания, имеют наилучший потенциал для удовлетворения более строгих требований к ограничению выбросов вредных веществ, которые могут быть введены в будущем, с наилучшим возможным расходом топлива. Конструкция гарантирует, что дымность отработавших газов остаётся ниже предела видимости даже в случае экстремально низкой нагрузки (рис. 16). Независимо от назначения двигателя (судовой или стационарный), стоимость жизненного цикла установки с CRDI сравнима с аналогичными агрегатами, оснащенными традиционной системой топливоподачи.

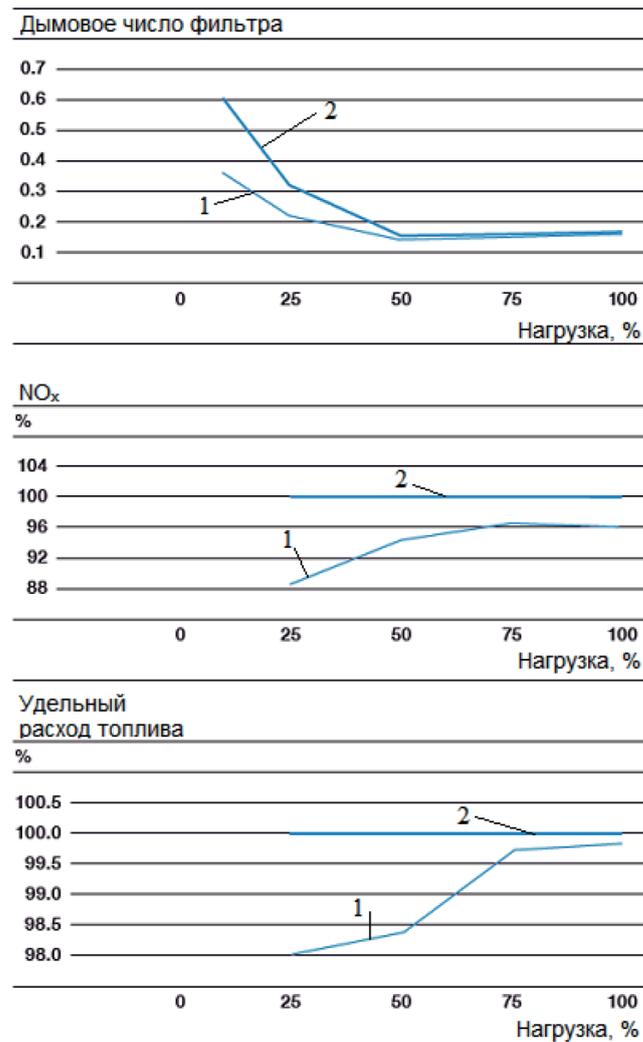


Рис. 16. Сопоставление характеристик двигателя с системой CRDI и традиционной системой топливоподачи:

- 1 — двигатель с системой CRDI;
 2 — базовый двигатель с традиционной системой топливоподачи

Безопасность при проектировании и эксплуатации является одним из наиболее важных факторов, особенно для судовых двигателей. Задача достижения высокой надежности охватывает все эксплуатационные аспекты, включая электронное оборудование системы CRDI. Основываясь более чем на 15-летнем (с 2001 г.) опыте разработки, эксплуатации и совершенствования аккумуляторных электронно-управляемых систем топливоподачи и используя ранее упомянутую подсистему анализа видов отказов и их последствий FMEA, MAN Diesel & Turbo успешно внедряет собственную концепцию безопасности. Относительно электронного оборудования системы задача заключается в разработке простой избыточной электронной системы CRDI.

Для однодвигательных установок классификационные общества требуют полной избыточной компоновки системы. Поэтому электроника для топливоподачи структурирована следующим образом. Контроллер CRDI полностью интегрирован в SaCoSone (Safety and Control System on Engine — система безопасности и управления двигателем). Данная система предусматривает использование двух модулей ЭБУ (рис. 17). После каждой остановки двигателя функция управления изменяется между двумя подключенными модулями, сохраняя при этом полную функциональность. В случае неисправности активного модуля впрыска резервный модуль берет управление на себя в течение миллисекунд. Все необходимые датчики, источник питания и система цепей питания шины являются резервируемыми / дублирующими по конструкции. Таким образом, одиночный отказ не приведет к отключению двигателя. С помощью резервной CAN-шины вся необходимая информация обменивается между устройствами SaCoSone и отображается на интерфейсе. Для многодвигательной установки возможна нестандартная конструкция системы управления CRDI. Электроника CRDI расширяет возможности обычного впрыска с помощью его свободно регулируемых параметров. Множество характеристических карт и параметров управления впрыском позволяют оптимизировать работу двигателя во всем диапазоне нагрузок.

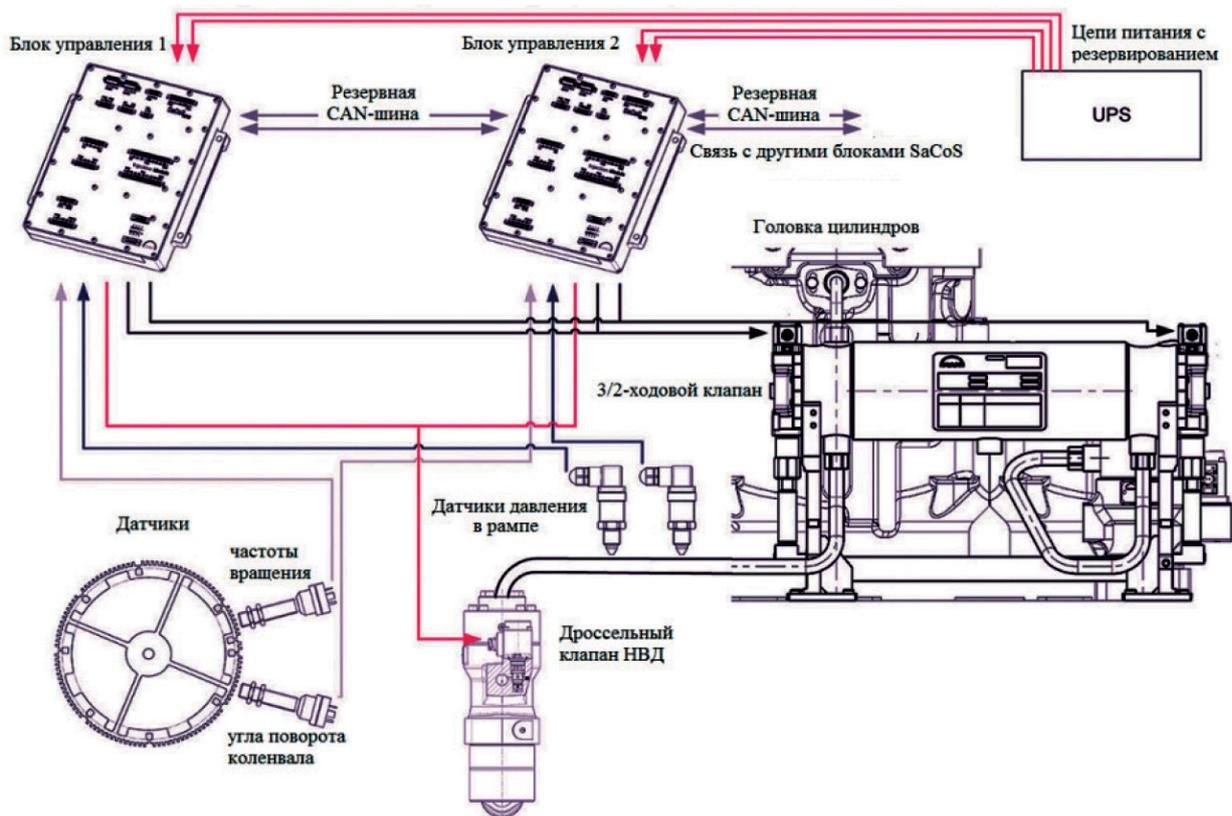


Рис. 17. Резервирование электронной системы управления

Кроме того, система электронного управления поддерживает и обеспечивает использование пакета PrimeServ Online Service, который способен автоматически и непрерывно в режиме online контролировать основные параметры работы системы CRDI и двигателя (рис. 18).

Эксперты MAN PrimeServ анализируют данные двигателя и дают ценные рекомендации по техническому обслуживанию, эксплуатации и ремонту двигателя. При возникновении нарушений заказчик будет немедленно проинформирован об этом, что позволит избежать длительных простоев. Также при необходимости эксперты могут поддерживать клиента при поиске и устранении неисправностей с помощью удаленного доступа.



Рис. 18. Online-сервис MAN Diesel & Turbo

На опыте разработок современных систем топливоподачи CRDI ведущим производителем двигателей судового назначения MAN Diesel & Turbo рассмотрены эксплуатационные особенности и их влияние на совершенствование конструкции энергетических установок. В качестве наиболее важных достижений необходимо выделить следующие:

- использование модульных принципов построения системы CRDI позволяют достичь высокой надежности элементов и системы в целом, обеспечить гибкость системы к адаптации в конструкции типоразмерного ряда двигателей, а также удобство хранения ЗИП системы;

- ввиду того, что форсунки находятся под давлением только во время подачи топлива в цилиндр, отсутствует опасность неконтролируемого впрыска даже в случае потери герметичности управляющих клапанов;

- внедрение в конструкцию компонентов высокого давления с двойной стенкой предотвращает отсутствие опасности протечки топлива в случае разрушений уплотнительных элементов или обрывов труб высокого давления;

- клапаны ограничения потока для каждого цилиндра минимизируют опасности чрезмерного количества впрыскиваемого топлива даже в случае утечки или сломанных компонентов;

- использование в схемном решении системы CRDI индивидуальных обратных клапанов предотвращает обратный поток из системы низкого давления в цилиндр в случае зависания иглы распылителя;

- дублирование топливных насосов высокого давления в системе CRDI предоставляет возможность аварийной работы двигателя при отказе одного из насосов;

- аварийная работа дизеля возможна даже в случае любого отказа подсистемы мониторинга давления в аккумуляторе благодаря дополнительной функции контроля давления предохранительным клапаном ограничения давления;

- в случае возникновения чрезвычайной ситуации двигатель может быть остановлен пневмоуправляемым промысловым клапаном, принимающим на себя дополнительные функции клапана аварийного останова;

- задействование принципов резервирования электронных элементов системы CRDI способно обеспечить бесперебойную работу энергетической установки даже в случае отказа основных датчиков системы или ЭБУ;

- комплектование системы управления двигателем подсистемой PrimeServ Online Service, способной автоматически и непрерывно контролировать основные параметры работы системы

CRDI и двигателя, обеспечивает техническую поддержку эксплуатационников в режиме удаленного доступа.

Заключение (Conclusion)

Несмотря на наличие достаточно большого количества недостатков системы CRDI, интеллектуальные аккумуляторные системы находят все более широкое применение в судовых дизельных энергетических установках, обеспечивая возможность достижения постоянно растущих требований к экономичности и экологической безопасности.

С уверенностью можно утверждать, что многообразие конструкций системы *Common Rail*, высокий уровень конструирования, применение прогрессивных материалов и технологий позволят производителям повысить уровень эксплуатационных свойств выпускаемого оборудования, а также создаст предпосылки к обеспечению желаемых ресурсных характеристик элементной базы системы.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Конструкцию современного дизельного двигателя в настоящее время невозможно представить без систем электронного управления процессами. Наиболее важным является процесс топливоподачи, управление которым производится посредством электронно-управляемой аккумуляторной системы высокого давления CRDI.

2. Эксплуатационные особенности судовых дизельных двигателей предъявляют повышенные требования к разработчикам в плане обеспечения надежности систем энергетических установок, в частности системы топливоподачи при одновременном соответствии постоянно растущим требованиям экологических стандартов, достижение которых в настоящее время оказывается практически невозможным без использования в конструкции двигателей системы CRDI.

3. Обладая рядом преимуществ по сравнению с более ранними системами топливоподачи, система CRDI не лишена недостатков, основным из которых является относительно низкая надежность комплектующих системы при их высокой стоимости.

4. К наиболее уязвимым узлам топливной системы CRDI в механическом плане следует отнести быстродействующий управляющий впрыском клапан форсунки.

5. Среди возникающих в эксплуатации неисправностей электронных элементов в первую очередь отмечается выход из строя первичных датчиков и электромеханических исполнительных устройств.

6. Опыт эксплуатации создаёт предпосылки к дальнейшему совершенствованию системы CRDI в целом и комплектующих её элементов, а также к существенному повышению надежности и достижению стабильных эксплуатационных свойств.

Авторы выражают благодарность инженеру, канд. техн. наук А. Ю. Мезерницкому и инженеру М. А. Волкову за предоставленные дополнительные данные по характерным неисправностям системы CRDI, а также за оказанные консультации в структурировании отказов системы, без помощи которых настоящая работа не была бы выполнена в настоящем объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов М. Ю. Современные средне- и высокооборотные дизели с электронными системами управления / М. Ю. Иванов, В. А. Шишкин, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 40–45.
2. Мельник Г. В. Системы электронного управления ДВС и их компоненты / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2010. — № 4. — С. 39–52.
3. Живлюк Г. Е. Опыт эксплуатации ДЭУ с аккумуляторными системами топливоподачи сверхвысокого давления / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-

практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 48–49.

4. Socol S. High-pressure components of common-rail system / S. Socol, W. Brühmann // *Diesel Engine Management*. — Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. — Pp. 128–151. DOI: 10.1007/978-3-658-03981-3_13.

5. Leonhard R. Injection Technology for Marine Diesel Engines / R. Leonhard, M. Parche, C. Kendlbacher // *MTZ worldwide eMagazine*. — 2011. — Vol. 72. — Is. 4. — Pp. 10–17. DOI: 10.1365/s38313-011-0035-z.

6. Kampichler D.I.G. Industrial and Marine Engines / D.I.G. Kampichler, I.H. Bülte, I.F. Koch, K. Heim // *Handbook of Diesel Engines*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. — Pp. 559–608. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6_18.

7. Живлюк Г. Е. Состояние и перспективы совершенствования систем топливopодачи Common Rail / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 1 (35). — С. 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.

8. Петров А. П. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.

9. Asada K. Improving Internal Fatigue Strength of the Rail for Diesel Engine Common Rail System / K. Asada, M. Usui, R. Kusanagi, E. Watanabe, K. Mizuno. — SAE Technical Paper, 2000. — № 2000-01-0707. DOI: 10.4271/2000-01-0707.

10. Thumser R. Investigation on defect distribution and its statistical evaluation for case hardened material states / R. Thumser, S. Kleemann, J. W. Bergmann, A. Kleemann // *International Journal of Fatigue*. — 2012. — Vol. 41. — Pp. 52–56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.024.

11. Kendlbacher C. Advanced injection systems for large marine and industrial engines / C. Kendlbacher, D. Blatterer, M. Bernhaupt // *MTZ industrial*. — 2015. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 42–49. DOI: 10.1007/s40353-015-0509-6.

12. MAN Diesel & Turbo — Common Rail. Design & Field Experience [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/348692064/man-common-rail-pdf> (дата обращения: 22.04.2017).

REFERENCES

1. Ivanov, M.Yu, V.A. Shishkin, and A.P. Petrov. “Present-Day Mid- & High-Speed Diesel Engines Featuring Electronic Controls.” *Dvigatestroyeniye* 4 (2006): 40–45.

2. Melnik, G.V. “Electronic Engine Control Systems and Components.” *Dvigatestroyeniye* 4 (2010): 39–52.

3. Zhivlyuk, G.E., and A.P. Petrov. “Opyt ekspluatatsii DEU s akkumulyatornymi sistemami toplivopodachi sverkhvysokogo davleniya.” *Sbornik tezisov dokladov natsional'noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S.O. Makarova*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017: 48–49.

4. Socol, Sandro, and Werner Brühmann. “High-pressure components of common-rail system.” *Diesel Engine Management*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. 128–151. DOI: 10.1007/978-3-658-03981-3_13.

5. Leonhard, Rolf, Marcus Parche, and Christoph Kendlbacher. “Injection Technology for Marine Diesel Engines.” *MTZ worldwide eMagazine* 72.4 (2011): 10–17. DOI: 10.1365/s38313-011-0035-z.

6. Kampichler, Dipl.-Ing Günter, I.H. Bülte, I.F. Koch, and K. Heim. “Industrial and Marine Engines.” *Handbook of Diesel Engines*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 559–608. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6_18

7. Zhivlyuk, Gregory Evgenyevich, and Aleksandr Pavlovich Petrov. “Status and prospects of perfection of fuel supply system common rail.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.

8. Petrov, Aleksandr Pavlovich, and Gregory Evgenyevich Zhivlyuk. “Development of electronic control systems of internal combustion engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.

9. Asada, Kikuo, Masayoshi Usui, Ryuichi Kusanagi, Eiji Watanabe, and Kazuteru Mizuno. “Improving Internal Fatigue Strength of the Rail for Diesel Engine Common Rail System.” No. 2000-01-0707. SAE Technical Paper, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-0707.

10. Thumser, Rayk, S. Kleemann, J. W. Bergmann, and A. Kleemann. “Investigation on defect distribution and its statistical evaluation for case hardened material states.” *International Journal of Fatigue* 41 (2012): 52–56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.024.

11. Kendlbacher, Christoph, Dieter Blatterer, and Martin Bernhaupt. “Advanced injection systems for large marine and industrial engines.” *MTZ industrial* 5.1 (2015): 42–49. DOI: 10.1007/s40353-015-0509-6.

12. MAN Diesel & Turbo — Common Rail. Design & Field Experience. Web. 22 April 2017. <<https://ru.scribd.com/document/348692064/man-common-rail-pdf>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Petrov, Aleksandr P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Received: January 15, 2018.