

34. Luo N., G. H. Miley, K. J. Kim, R. Burton, and X. Huang. "NaBH₄/H₂O₂ fuel cells for air independent power systems." *Journal of Power Sources* 185.2 (2008): 685–690.
35. Mendez Alejandro, Teresa J. Leo, and Miguel A. Herreros. "Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: State of the art." *Conference Proceedings Paper - Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions»*. 2014: 19 p. Web. 25 July 2015 < <http://sciforum.net/conference/ece-1/paper/2345>>.
36. Shpak, A. I., and Ya. N. Chuksin. "Analiz sovremennogo sostoyaniya i putey razvitiya zarubezhnykh neatomnykh podvodnykh lodok." *Morskoy vestnik Spetsialnyy vypusk* 1(2) (2004): 26–31.
37. Mozgovoy, A. "Podvodnye lodki v god vodyanogo drakona." *Natsionalnaya oborona* 1 (2012): 16–42.
38. Zamukov, V. V., S. A. Petrov, and D. V. Sidorenkov. "State and prospects of development of air-independent power plants of submarines." *Sudostroenie* 5 (2007): 39–42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Евгений Александрович —
доктор технических наук, профессор.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романова Елена Анатольевна — аспирант.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романов Алексей Дмитриевич — инженер.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernyshov Evgeny Aleksandrovich —
Doctor of Engineering, professor.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanova Elena Anatolievna — graduate student.
Nizhny Novgorod State Technical University n. a.
R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanov Aleksey Dmitrievich — engineer.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru

УДК 621.431.074

А. П. Петров,
Г. Е. Живляук

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Введение норм ИМО Tier III в 2016 г. требует снижения выбросов оксидов азота (NO_x) с отработавшими газами двигателей на 75 % по сравнению с нормами ИМО уровня Tier II. Сокращение выбросов может быть достигнуто лишь путем применения новых технологий для судовых дизельных двигателей. Для того чтобы контролировать выбросы, не ухудшая экономичности, эти технологии должны быть направлены на значительное улучшение параметров топливо- и воздухообеспечения двигателя.

Представленная работа сосредоточена на рассмотрении направлений применения и развития электронных технологий управления с целью создания дизелей с гибкими системами управления, обладающими такими достоинствами, которые позволят обеспечить соблюдение указанных международных норм. Эти направления были широко представлены на 25 – 27 Конгрессах Международного совета по двигателям внутреннего сгорания (CIMAC Congress). Показаны достижения в части разработки и применения традиционных (низкого давления) систем топливоподачи с электронным управлением процесса впрыска топлива в цилиндры двигателя и систем топливоподачи высокого давления более сложного исполнения. Рассмотрены предлагаемые технические аспекты реализации управления фазами газораспределения, рециркуляцией отработавших газов и агрегатами турбонаддува.

В каждом конкретном случае целесообразно использовать либо локальные способы управления рассмотренными технологиями, либо их сочетанием, т.е., используя комплексный подход.

Ключевые слова: дизель судовой, управление автоматическое, система управления электронная, блок управления электронный, топливоподача, впрыск топлива, воздухообеспечение, газотурбинный наддув, газораспределение, отработавшие газы, рециркуляция.

РАЗВИТИЕ современного двигателестроения происходит под влиянием достаточно большого числа факторов. Наиболее важными факторами развития являются конкурентная борьба разработчиков и изготовителей за достижение наивысшей энергетической, экономической эффективности конструкций, а также за обеспечение постоянно ужесточающихся экологических международных норм и правил (EPA Tier4, IMO Tier3 и EU3b) [1], [2]. Техническое обеспечение этих факторов невозможно без точного управления на всех эксплуатационных режимах процессами, составляющими рабочий цикл двигателя.

Механическое управление процессами, которое безальтернативно превалировало на протяжении всей истории развития конструкций двигателя, вплоть до конца прошлого века, имеет ограниченные возможности и позволяет достичь требуемых параметров только в узком диапазоне режимов настройки. И, если вначале появлялись локальные электронные устройства, обеспечивающие дистанционное автоматизированное управление, регулирование, сигнализацию, защиту и индикацию параметров двигателя, то сейчас этого оказалось недостаточно. Расширение области настройки в этом случае влечет за собой значительное усложнение конструкции и, как следствие, ее существенное удорожание. В этой связи, с конца 70-х гг. прошлого века наряду с совершенствованием традиционных средств топливоподачи и воздухообеспечения дизеля предпринимаются [3] — [5] попытки создания так называемого «адаптивного» двигателя, в котором управление процессами находилось бы под программным электронным контролем вычислительной техники (процессоров и микропроцессоров) [6].

Достигнутые положительные результаты использования электронного управления поршневым двигателем, а также быстрое совершенствование микропроцессорной техники, элементной базы и программного обеспечения создали предпосылки к внедрению электронноуправляемых систем в массовое производство. Таким образом, современное двигателестроение практически невозможно представить без микропроцессорных систем управления процессами, происходящими в двигателе внутреннего сгорания [7] — [11].

В первую очередь это относится к управлению процессами топливоподачи (и, как следствие, смесеобразования и сгорания), так как его использование дает наибольший вклад в эффективность электронного управления двигателем в целом. Поэтому во многих случаях применение только топливной системы с электронным управлением (ТСЭУ) уже оправдывает создание электронных систем управления (ЭСУ) двигателем. Основное назначение ТСЭУ — управление мощностными режимами двигателя и обеспечение возможности оптимизации его рабочего процесса. Наиболее полное использование адаптивного управления возможно при индивидуальном управлении подачей жидкого или газообразного топлива в каждом рабочем цикле каждого цилиндра двигателя.

ТСЭУ двигателей различаются, прежде всего, уровнем давления топлива. ТСЭУ «низкого» давления (0,2 – 1,0 МПа) — для подачи легкого жидкого топлива или газов во впускные каналы цилиндров, «среднего» давления (20 – 40 (60) МПа) и наиболее сложные и разнообразные — ТСЭУ «высокого» давления (до 200 МПа) для впрыска жидкого топлива непосредственно в цилиндры, используемые в двигателях с самовоспламенением топлива — дизелях. В любом варианте ТСЭУ представляет собой совокупность электрогидравлических устройств, преобразующих электрические управляющие сигналы, формируемые микроконтроллером (электронным блоком управления — ЭБУ), в гидравлические импульсы давления впрыска топлива. При этом управляемыми элементами, в которых устанавливаются электромеханические преобразователи или электрические клапаны, могут быть насосы высокого давления, магистрали высокого, среднего и низкого давления, форсунки и топливоподкачивающие насосы.

Имеется достаточно большое число вариантов ТСЭУ, отличающихся применяемыми источниками питания форсунок топливом и способами управления параметрами впрыска. Применительно к ТСЭУ высокого давления можно выделить следующие основные их классы с присущими им главными отличительными признаками.

1. Импульсное питание форсунок от топливного насоса высокого давления (ТНВД) с механическим приводом плунжеров с непрерывным усредненным управлением впрыском в ТНВД — ТСЭУ с непрерывно управляемыми ТНВД, или сокращенно — *непрерывно управляемые ТСЭУ*.

2. Импульсное питание форсунок от ТНВД с механическим приводом плунжеров, с импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в магистралях высокого давления или форсунках — *механоприводные ТСЭУ*.

3. Импульсное питание форсунок от ТНВД с пневматическим приводом плунжеров и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в магистралях высокого давления или форсунках — *пнеumoприводные ТСЭУ*.

4. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива среднего давления и импульсной мультипликацией в ТНВД, с гидравлическим приводом плунжеров, импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в ТНВД или/и форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях среднего давления — *гидроприводные ТСЭУ*.

5. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива высокого давления и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью, и опережением впрыска в форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях высокого давления — *аккумуляторные ТСЭУ*.

Во всех вариантах ТСЭУ наиболее важными являются те функциональные возможности, которые трудно осуществимы или вообще неосуществимы в неэлектронных топливных системах. В их числе:

- раздельная управляемость величиной подачи, давлением, опережением, числом фаз, формой характеристики впрыска, числом работающих цилиндров (циклов), равномерностью нагрузки цилиндров, ограничением подачи;

- независимость давления впрыска от длительности и опережения впрыска, а также независимость опережения впрыска от длительности и давления впрыска;

- возможность сохранения работоспособности двигателя при отказах отдельных элементов ТСЭУ.

Сложность адаптации ТСЭУ на двигателе определяется объемом и характером изменений, вводимых в другие агрегаты двигателя, необходимых для размещения и работы ТСЭУ.

Несмотря на то, что каждый из вариантов систем обладает рядом достоинств, наибольшее распространение с конца прошлого века получили электронно-управляемые аккумуляторные системы впрыска – системы Common Rail (CRS). Системы CRS отличаются относительной простотой устройства и адаптации к конструкции двигателя. В этой связи в настоящее время подавляющее большинство малоразмерных высокооборотных дизельных двигателей автотранспортного назначения укомплектованы топливными системами этого типа, они, в числе прочих, способны обеспечивать требуемые параметры экологичности работы двигателя.

Аналогично экологическим требованиям к двигателям автотранспортного назначения, продолжают ужесточаться требования к выбросам вредных веществ и для мощных стационарных и судовых дизельных двигателей (табл. 1) [12]. Очевидно, что эти требования должны удовлетворяться при условии сохранения:

- надежности и ресурса;
- расхода топлива;
- допустимого уровня начальных затрат и эксплуатационных расходов.

Их данных табл. 1 следует, что достижение требований Tier 3 и выше возможно только в случае использования систем CRS.

Таблица 1

Контрольные показатели системы для крупных дизелей

Категория двигателей	Требования к выбросам	ПДК г/кВтч	Год	Система впрыска топлива
Высокооборотные (> 1500 об/мин)	Tier 2 (> 560 кВт)	$NO_x < 6,40$ $PM < 0,20$	2004	блочные/индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 180 МПа + множественный впрыск
	Tier3 (< 560 кВт)	$NO_x < 4,00$ $PM < 0,20$	2008	блочные/индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 160 МПа + множественный впрыск
	Tier 4	$NO_x < 0,40$ $PM < 0,02$	2008–2015	Common Rail < 180 МПа – множественный впрыск; – профилирование кривой впрыска
Среднеоборотные (< 1200 об/мин)	Tier 2/ ж/д США	$NO_x < 7,40$ $PM < 0,27$	2005	блочные/ индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 160 МПа + множественный впрыск
	Tier 3/ ж/д США судовые США	$NO_x < 0,74$ $PM < 0,027$	2008–2015	Common Rail < 180 МПа – множественный впрыск; – профилирование кривой впрыска

Поиск оптимальных решений эффективной конструкции системы CRS для среднеоборотных дизельных двигателей привели к созданию модульных систем MCRS [13]. Модульная конструкция использует унифицированные элементы для обеспечения значительного модульного наращивания системы, при этом выбор конфигураций позволяет интегрировать решения в существующие модели двигателей.

В табл. 2 приводятся результаты сравнения «обычных» ТСЭУ и CRS по основным параметрам. Под «обычными» здесь понимаются системы, где впрыск производится под действием кулачка, топливоподача регулируется электромагнитным клапаном, а давление топлива зависит от частоты вращения и нагрузки двигателя. В системе CRS давление топлива всегда постоянно. Это — система высокого давления без гидравлического усиления.

Таблица 2

Параметр/система	«Обычные» ТСЭУ	CRS
Максимальное давление впрыска	< 25 МПа	< 200 МПа
Пики давления	> + 20 МПа	< + 20 МПа
Множественный впрыск	– Возможности ограничены (из-за влияния соотношения внутреннего диаметра и длины трубок)	– Суммарное запаздывание > 0,4 мс (инерция клапана и сопла)
Возможности замены обычной системы	– Возможны проблемы с совместимостью коллектора (или коллекторов) и с испытаниями системы для различных конфигураций двигателей (L6 – V18)	– Простая замена – Испытываются только компоненты системы (конфигурация двигателя влияния не оказывает)
Безопасность	– Экранированные трубки и коллектор (или коллекторы)	– Экранированные трубки (диаметр трубок меньше, чем в предыдущем случае)
Стоимость	– Базовая	– Больше примерно на 30 %

Сравнение «обычных» ТСЭУ и модульной CRS

Возможности системы CRS типа «коллектор — трубка — форсунка» ограничены. Пульсации давления в трубках и форсунках, а также более высокая стоимость (особенно в двигателях более мощных, нежели различные модификации автомобильных дизелей) — таковы причины, заставившие конструкторов искать новые решения. При этом была поставлена задача создания более гибкой системы, лишенной упомянутых недостатков, а именно — модульной системы MCRS.

Для подавления пульсаций давления в ТНВД встроена демпфирующая емкость. Объем коллектора разделен на отдельные объемы, встроенные в форсунки. Тем самым уменьшается расстояние между аккумулятором топлива и соплами, что способствует значительному снижению пульсаций. ТНВД и форсунки соединены трубками высокого давления с внутренним диаметром 3 и 4,5 мм. Входные дроссели форсунок препятствуют распространению остающихся пульсаций давления по топливной системе. Объем демпферной полости каждой форсунки в 50 — 70 раз превышает объем максимальной цикловой подачи.

Снижение уровня пульсаций давления в трубках между ТНВД и форсунками позволило встроить редукционный клапан и датчик давления в аккумулятор высокого давления. Для высокооборотных двигателей оптимальной является схема с блочным насосом высокого давления на две, три, четыре или пять секций, приводной вал которого вращается со скоростью 1000 или 3000 об/мин. В среднеоборотных двигателях используются индивидуальные внешние насосы высокого давления. Они имеют собственные аккумуляторы со встроенными редукционными клапанами и датчиками давления. Размеры форсунок позволяют при этом организовать боковой подвод топлива.

Конструкция со встроенными управляющими клапанами, предназначенными для будущих двигателей грузовых автомобилей, позволяет приступить к созданию форсунок со встроенными аккумуляторами топлива. Такой управляющий клапан отличается оптимальной компоновкой, он имеет высокое быстродействие и гидравлически уравновешен. Клапан устанавливается в непосредственной близости от сопла, что позволяет свести к минимуму влияние пульсаций давления и массы на характеристики переключения сопла.

С обратной стороны седла иглы форсунки находится камера с регулируемым давлением, впускной и выпускной жиклеры которой встроены в плиту между электромагнитным клапаном и соплом. Электромагнитный клапан управляет открытием и закрытием иглы форсунки, и таким образом контролирует впрыск. Электромагнитный клапан, действующий по этому принципу, разработан применительно к трем типоразмерам форсунок, в сумме перекрывающих диапазон цикловых подач от 500 до 3000 мм³.

Моделирование пульсаций в гидросистеме для среднеоборотного двигателя показало преимущества модульной системы MCRS по сравнению с «обычной». Сравнение пульсаций, измеренных в «обычной» и модульной системах MCRS, показывает несомненное преимущество последней в части не только пульсаций и скорости впрыска, но и других показателей (см. табл. 2).

Свойственное модульной системе уменьшенное расстояние между встроенным аккумулятором и соплом влияет также на скорость впрыска в первой фазе. Путем соответствующего конфигурирования впускного и выпускного жиклеров можно повлиять на скорость впрыска таким образом, чтобы снизить скорость нарастания давления в цилиндре. В модульной системе можно применить также пилотный впрыск для дальнейшего снижения градиента давления в цилиндре.

Величина снижения давления топлива к концу впрыска в модульной системе зависит только от объема форсунки и сечения впускного жиклера. В обычной системе CRS на величину цикловой подачи сильное влияние оказывают также внутренний диаметр и длина топливной трубки.

Положительный опыт применения модульной системы MCRS на высокооборотных и среднеоборотных двигателях позволил внедрить ее в серийное производство в 2005 г. Высокие ди-

наимические характеристики системы обеспечивают значительный потенциал для улучшения параметров двигателей, повышения их топливной экономичности и дальнейшего снижения вредных выбросов. Некоторое увеличение (примерно на 30 %) объема высокого давления не приводит к снижению динамических характеристик системы, которая сохраняет при этом устойчивость на всех режимах.

На рис. 1 показана принципиальная схема модульной системы MCRS-22. Основные компоненты системы: питательный насос (ПН), насос высокого давления (НВД), впускной дозирующий клапан (ВДК), датчик давления (ДД), перепускной клапан (ПК), форсунку и электронный блок управления (ЭБУ).

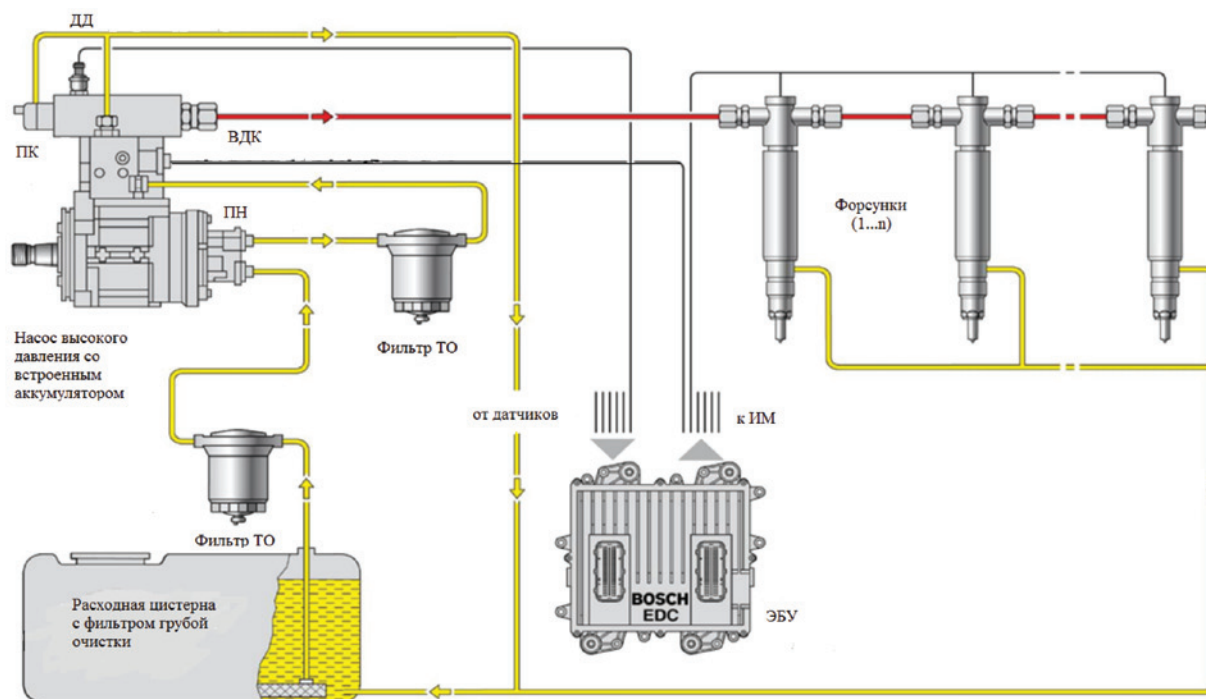


Рис. 1. Модульная система MCRS-22

ПН подает топливо из бака через предварительный фильтр и фильтр тонкой очистки в НВД. ВДК регулирует количество топлива на входе НВД и, следовательно, давление топлива в системе высокого давления. Поршневой насос высокого давления создает высокое давление и подает топливо в аккумулятор насоса. Аккумулятор насоса как емкость в системе демпфирует колебания давления из-за насосных ходов, оснащен ДД и ПК. Топливопровод высокого давления соединяет НВД с форсунками и питает их. Каждая форсунка имеет входное отверстие, чтобы предотвратить взаимодействия между форсунками и топливным аккумулятором, чтобы обеспечить высокое среднее давление впрыска для лучшего распыления топлива. MCRS не имеет общего топливного аккумулятора, поскольку ими оснащены и насос, и форсунки. Это позволяет оптимизировать конструктивное сочетание элементов топливной системы высокого давления применительно к двигателям от рядных 6-цилиндровых до V-образных, 20-цилиндровых двигателей. Если обычные CRS используются в производстве высокооборотных двигателей с давлением топлива 1600 бар и среднеоборотных двигателей с давлением 1800 бар с 2005 г., то производство MCRS-16 (1600 бар) освоено в 2011 г.

Для соблюдения EPA Tier IV и EU3b EC была разработана MCRS-22 (2200 бар), поставленная на производство в 2013 г. для среднеоборотных двигателей, работающих на HFO. Эти двигатели должны соответствовать нормам IMO Tier III в зонах контроля выброса газа в атмосферу. Ее отличие от рассмотренной состоит в иной системе организации высокого давления топлива, обеспечиваемой не одним насосом, а несколькими, соответствующими количеству цилиндров топливных насосов.

Заслуживают разработки и исследования фирм *Mitsubishi Heavy Industries (MHI)*, *MAN Diesel & Turbo SE* и др. [14] — [16]. Так, по данным *MHI*, испытания двигателя типа 6V MARK-30B с опытной системой CRS выявили возможность снижения на 15 % NOx при том же расходе топлива на режиме номинальной мощности, а также снижение дымности на малых нагрузках до 60 % по сравнению с двигателем, оснащенный обычной механической системой топливоподачи. Поэтому система CRS оценивается фирмой как важное направление развития систем топливоподачи в ближайшем будущем. Наряду с этим фирмой в 2005 г. разработана электронная система управления цикловой подачей топлива UEC Eco-Engine, которая обеспечивает контролируемый впрыск топлива и помогает улучшить баланс между тепловой эффективностью и выбросами NOx. Тем самым было обеспечено соблюдение норм IMO Tier II по выбросам NOx. Дальнейшему ужесточению требований IMO Tier III фирма ответила контрмерами в виде каталитической очистки отработавших газов, применения цикла Миллера и рециркуляции отработавших газов.

Наряду с ТСЭУ, не менее важным аспектом рассматриваемой проблемы является разработка и доводка конструкции электронных систем управления фазами газораспределения. Управление фазами газораспределения позволяет обеспечить некоторые преимущества в организации рабочего процесса судовых двигателей: повышение экономичности без увеличения тепловой и механической напряженности, улучшение экологических показателей, улучшение характеристики крутящего момента и существенное расширение диапазона его значений.

Для достижения этих целей были разработаны многие технологии, но сложно выполнить все требования по ограничению выбросов без ухудшения топливной экономичности двигателя. Следовательно, объединение нескольких технологий может быть полезно в целях повышения эффективности двигателя в пределах вводимых ограничений, за счет оптимизации параметров рабочего процесса. Применение цикла Миллера [17] является эффективным способом уменьшения выбросов, особенно оксидов азота (NOx); это обусловлено тем, что температура горения становится ниже, так как эффективная степень сжатия уменьшается. Поскольку впускной клапан открывается на короткое время, повышение давления наддувочного воздуха необходимо для того, чтобы подать достаточное количество воздуха в камеру сгорания. Интересно, что воспламенение от сжатия по циклу Миллера используется в двигателях с наддувом и изменяемой степенью сжатия [18] и в сочетании с рециркуляцией отработавших газов (EGR — Exhaust Gas Recirculation) [19]. Кроме того, установлено [20] снижение на 20 % содержания NOx. Разделение впрыска топлива на два или более подвпрысков может помочь в получении более равномерного и контролируемого сгорания. В частности, впрыск в такте сжатия может увеличить задержки воспламенения и, следовательно, время смешения воздуха и топлива. Исследована возможность снижения выбросов NOx тяжело нагруженными двигателями [21], и обнаружено, что, используя большой показатель перепуска EGR, возможно снизить выбросы NOx почти на 100 %, а КПД повышается на 15 % по сравнению с базовым оснащением. Исследовался также ранний впрыск пилотного топлива [22] наряду с EGR в двигателе грузового автомобиля, благодаря чему удалось уменьшить выбросы NOx на 35 % с некоторым увеличением расхода топлива. Значительное внимание реализации методики Миллера уделяется фирмой *MAN-B&W Turbo* [23] — [25].

Один из конструктивных вариантов изменения фаз в двигателях с традиционным механическим управлением — пропорциональный исполнительный механизм, изменяющий угловое положение распределительного вала. Однако этот вариант осуществим в конструкции двигателей, впускные и выпускные клапаны которых приводятся разными распределительными валами. Тогда управление может осуществляться как отдельно по каждому валу, так и одновременно. Системы VVT (Variable Valve Timing) (рис. 2) получили достаточно широкое распространение.

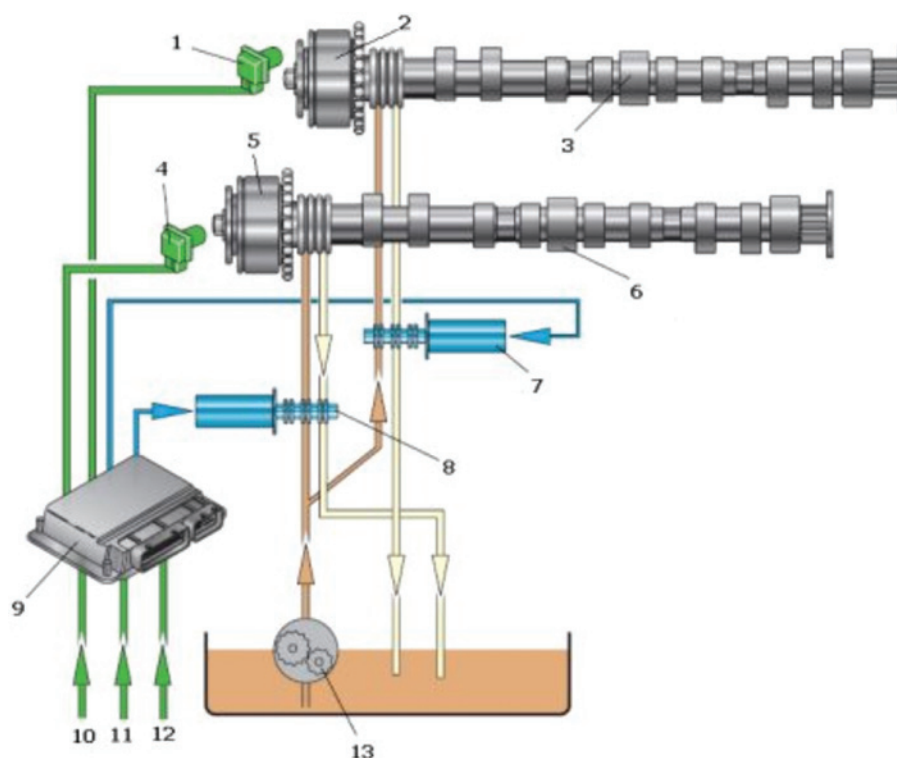


Рис. 2. Конструкция системы VVT:

- 1 — датчик Холла впускного распределительного вала;
2 — гидроуправляемая муфта впускного вала (фазовращатель); 3 — впускной распределительный вал;
4 — датчик Холла выпускного распределительного вала;
5 — гидроуправляемая муфта выпускного вала (фазовращатель); 6 — выпускной распределительный вал;
7 — электрогидравлический распределитель впускного вала (электромагнитный клапан);
8 — электрогидравлический распределитель выпускного вала (электромагнитный клапан);
9 — блок управления двигателем; 10 — сигнал от датчика температуры охлаждающей жидкости;
11 — сигнал расходомера воздуха;
12 — сигнал датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя; 13 — масляный насос

Система позволяет плавно изменять фазы газораспределения в соответствии с условиями работы двигателя. Это достигается путем поворота распределительного вала впускных клапанов относительно вала выпускных в диапазоне $40 - 60^\circ$ (по углу поворота коленвала). В результате изменяется момент начала открытия впускных клапанов и величина времени «перекрытия» (т. е. времени, когда выпускной клапан еще не закрыт, а впускной — уже открыт).

Возможно также использование пространственных кулачков сложного профиля, позволяющих изменять не только фазы газораспределения, но и высоту подъема клапанов. Электронное управление газораспределением за счет изменения углового положения распределительного вала или смены профиля работающего участка кулачков может быть осуществлено равномерно для всех цилиндров. Наиболее гибкое управление газораспределением возможно при использовании индивидуального гидравлического или электромагнитного привода клапанов. В этом случае можно отказаться от использования кулачковых валов механизма газораспределения. Гидравлический привод клапанов и электромагнитные клапаны газораспределения (описанные ранее) позволяют обеспечить индивидуальную оптимизацию продолжительности фаз и перемещения каждого клапана в любое время на любом режиме работы двигателя, вплоть до полного отключения отдельных цилиндров (циклов), и быстрый перевод двигателя в тормозной режим.

В качестве иллюстрации к сказанному можно привести результаты модификации двигателя MAN-B&W 6L60MC [16], который был подготовлен для использования электронного управления в рамках концепции Intelligent Engine (IE). Механико-гидравлические компоненты системы

управления были смонтированы на двигателе при его установке на судно. Агрегаты гидроцилиндра установлены на верхней платформе над традиционным распредвалом перед обычными ТНВД. Гидравлический блок питания был установлен на переднем конце двигателя; привод гидравлического насоса объединен с приводом компенсатора крутильных колебаний. Фирма *MAN B&W* начала разработку электронной системы управления для судовых малооборотных дизелей в 1990 г. В 1993 г. на стенде центра в Копенгагене начались испытания опытного дизеля 4T50ME-X без распределительного вала, на котором управление подачей топлива в цилиндры и открытием выпускных клапанов осуществлялось с помощью электронной системы. В ноябре 2000 г. на т/х «Bow Cecil» на двигатель 6L60MC в параллель с механической системой распределения была установлена ЭСУ, испытанная на опытном дизеле. Общий вид дизеля ME в сравнении с двигателем типа MC показан на рис. 3. На двигателе типа ME отсутствуют следующие компоненты:

- цепной привод;
- отсек цепного привода;
- распределительный кулачный вал;
- механизм привода толкателей топливных насосов и выпускных клапанов;
- топливные насосы высокого давления;
- воздухораспределитель;
- механический регулятор частоты вращения с приводом;
- механический привод лубрикаторов цилиндров;
- местный пост управления.

Для выполнения функций перечисленных компонентов предусмотрены следующие устройства:

- агрегат для подачи силового гидравлического масла;
- исполнительные гидравлические агрегаты для каждого цилиндра;
- система управления двигателем, обеспечивающая выполнение следующих функций: электронное управление изменением давления впрыскиваемого в цилиндр топлива; 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 воздушовками; управление процессами смазки цилиндров;
- система определения угла поворота вала;
- лубрикаторы цилиндров с электронным управлением;
- местная панель управления.

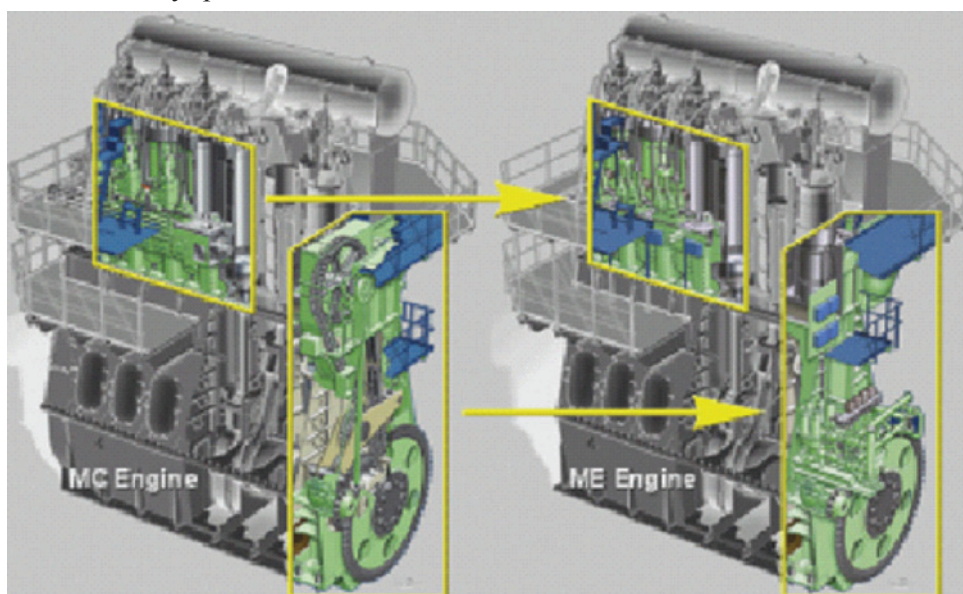


Рис. 3. Общий вид дизеля типа ME в сравнении с двигателем типа MC

На рис. 4 показана схема системы впрыска топлива в цилиндр. Система существенно отличается от систем CRS.

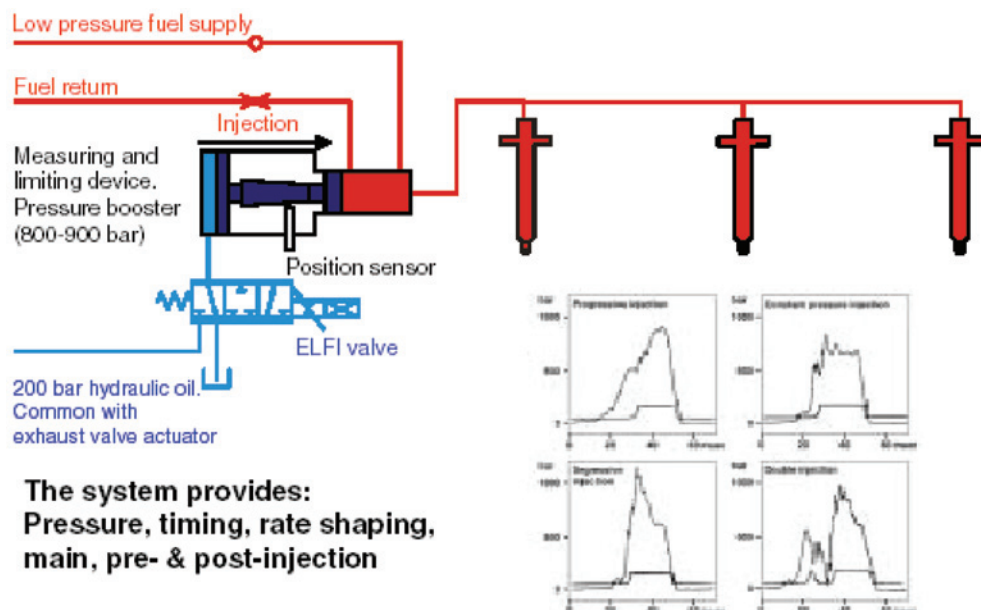


Рис. 4. Схема системы впрыска топлива в цилиндр двигателей типа ME:

Low pressure fuel supply — подача топлива низкого давления;

Fuel return — возврат топлива; Measuring and limiting device.

Pressure booster (800 – 900 bar) — измерительное и лимитирующее устройство.

Гидроусилитель (800 – 900 бар); Position sensor — датчик позиции; ELFI valve — клапан ELFI;

200 bar hydraulic oil. Common with exhaust valve actuator — гидравлическое масло давлением 200 бар, как и для толкателя выпускного клапана

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

- снижение расхода топлива;
- улучшение маневренности двигателя;
- возможность снижения эмиссии окислов азота.

В электронной системе управления предусмотрена возможность выбора двух видов режимов работы двигателя: режим оптимального расхода топлива и режим минимальной эмиссии NOx. Снижение выбросов NOx достигается за счет осуществления двухфазного впрыска топлива, снижения максимального давления и температуры рабочего цикла. Естественно, это приводит к увеличению удельного расхода топлива, но режим низкой эмиссии NOx используется только в ограниченных акваториях плавания.

Для сравнения были рассмотрены материалы испытаний для получения сертификата о типовом одобрении двигателя MAN B&W Turbo 7L70MC-C с традиционным механическим приводом органов распределения и двигателя MAN B&W Turbo 6S70ME-C с электронным управлением. Сопоставление результатов этих испытаний показывает, что все количественные показатели функционирования обоих двигателей практически идентичны в пределах погрешностей измерений. Единственное заметное отличие, которое обращает на себя внимание, это существенное уменьшение минимальной частоты вращения двигателя новой модификации (12 – 17 % от $n_{ном}$) по сравнению с традиционным (25 % от $n_{ном}$). Фирма обращает внимание [26] на то, что около 85 % от всех новых заказов составляют двухтактные дизельные двигатели с электронным управлением ME типа / ME-C / ME-B. Эта тенденция охватывает все размеры двигателя, однако наиболее существенна для двигателей большого диаметра (80, 90, 98), где почти 100 % всех заказов составляют двигатели ME типа.

Рассмотренные конструкции поршневых двигателей с электронным управлением далеко не исчерпывают возможности использования ЭСУ. Известно, что система газотурбинного наддува решающим образом влияет на характеристики двигателей, в особенности — высокофорсированных. Улучшение наполнения цилиндров при турбонаддуве ограничено инерционностью и низкой эффективностью турбокомпрессоров на низких частотах вращения двигателей. Повышение эффективности турбокомпрессора на низких частотах вращения за счет изменения конструкции и улучшения его параметров неизбежно приводит к излишнему давлению наддува при полной мощности, вплоть до возникновения помпажа. Во избежание этих нежелательных явлений в обход турбины формируется канал — пневмоуправляемый байпас. Очевидно, что на режимах больших нагрузок двигателя, энергия отработавших газов, перепущенных через байпас турбины, полностью теряется. Поэтому для преодоления недостатков неуправляемых систем наддува в последнее время все шире стали применяться системы с электронным управлением. Наиболее эффективным способом управления турбиной представляется поворот рабочих лопаток, однако управление турбокомпрессором поворотом лопаток турбины на частотах ее вращения порядка 70000 об/мин никому еще не удалось довести до широкого применения. Поэтому, в основном, на практике находят применение:

- изменение геометрии направляющего соплового аппарата турбины (или проходного сечения на входе в турбину), например, за счет поворота направляющих лопаток или перемещения неподвижного кольца вдоль направляющих лопаток;
- передача избыточной мощности турбины при больших нагрузках двигателя на коленчатый вал (так называемые комбинированные двигатели);
- наличие двух турбин, одна из которых приводит компрессор, а другая — силовая — в необходимых случаях может работать на коленчатый вал.

Наиболее прогрессивным является применение в высокофорсированных двигателях системы управления турбокомпрессором [27], [28] за счет использования непосредственно в турбокомпрессоре встроенной электрической машины. В простейшем варианте (рис. 5) эта система использует встроенную в турбокомпрессор электрическую машину, чаще всего переменного тока в виде электродвигателя, питаемого для управления частотой вращения от инвертора, создающего переменный электрический ток с регулируемой частотой и напряжением. Инвертор питается от генератора, связанного непосредственно с коленчатым валом двигателя и/или от аккумуляторной батареи.

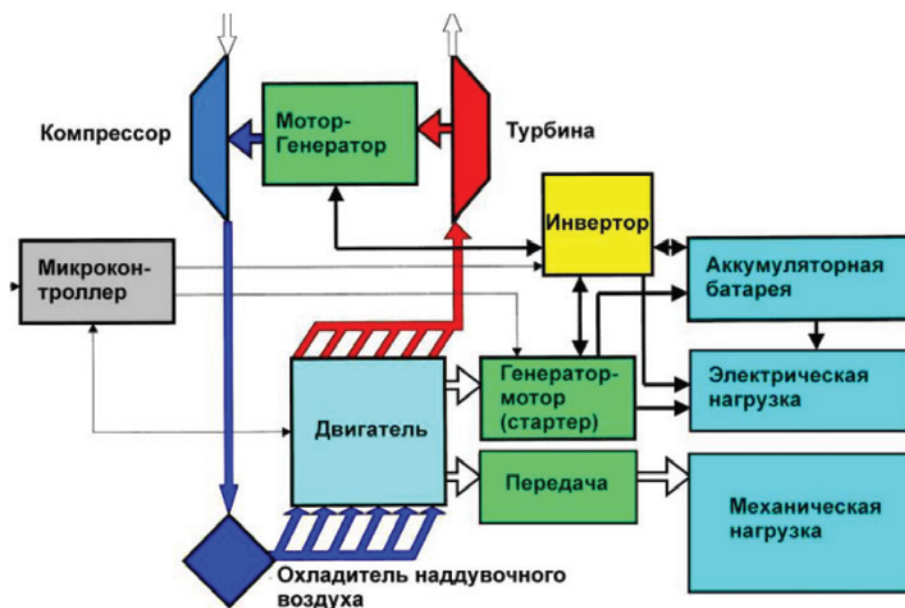


Рис. 5. Схема двигателя с электронно-управляемым турбокомпрессором

В процессах пуска, разгона, на холостых ходах и малых нагрузках электродвигатель, создавая дополнительный крутящий момент на валу турбокомпрессора, разгоняет его до достижения оптимального по расходу топлива давлением наддува. На режимах максимальной мощности дополнительный крутящий момент от электродвигателя не требуется, и он может быть отключен от электрической сети (вместе с инвертором).

Вариант применения турбокомпрессора с электроприводом предусматривает выбор его параметров из условий достижения оптимального давления наддува при полной нагрузке двигателя, т. е. при неполном использовании энергии отработавших газов. Более рационален вариант, в котором на всех режимах работы двигателя эта энергия используется максимально. Для этого электромотор турбокомпрессора должен быть обратимым и при больших нагрузках двигателя, когда мощность турбины больше необходимой для создания оптимального давления наддува, он переводится в режим генератора. Этот генератор через обращенный инвертор передает электрическую энергию обращенному в мотор генератору двигателя, имеющему механическую связь валов. Микроконтроллер, регулируя мощность, отбираемую обращенным генератором турбокомпрессора и передаваемую в сеть энергетической установки, аккумуляторную батарею и сверх этого через обращенный в мотор генератор двигателя — на вал двигателя, снижает частоту вращения турбокомпрессора до уровня, обеспечивающего оптимальное давление наддува.

Рассматривая программное управление процессами, происходящими в системе газо-воздушных трактов поршневого двигателя внутреннего сгорания, нельзя не упомянуть о волновой и резонансной настройке коллекторов с целью обеспечения максимальной плотности свежего заряда цилиндра (увеличения коэффициента наполнения) и улучшения очистки цилиндра (снижения количества остаточных газов). При волновой настройке для повышения наполнения необходимо, чтобы перед закрытием впускного клапана к нему подошла отраженная волна давления, а для улучшения очистки цилиндра от продуктов сгорания — чтобы перед закрытием выпускного клапана к нему подошла волна разрежения. Очевидно, что время прихода волн зависит от длин впускных и выпускных каналов. В зависимости от режима работы двигателя, ЭБУ управляет длиной впускного канала, используя подвижные элементы, увеличивающие длину канала, и (или) подключает поочередно с помощью заслонок каналы различной длины.

Резонансная настройка достигается изменением частоты собственных колебаний рабочего тела во впускной (выпускной) системе. При возникновении резонанса амплитуда волн давления увеличивается и увеличивается эффект от волновой настройки. Собственная частота колебаний газа в системе зависит от массы газа, поэтому для резонансной настройки по определенной программе к системе подключают дополнительные объемы.

Важная роль в формировании экологических характеристик двигателя отводится системе рециркуляции отработавших газов (EGR). Использование системы EGR (рис. 6) позволяет снизить эмиссию оксидов азота и несгоревших углеводородов в составе отработавших газов двигателя на режимах частичных нагрузок и холостого хода за счет строго дозируемого подмеса ОГ к свежему заряду цилиндра [27] — [32].

Ввиду сложности процессов точное управление системой требует использования программных методов. В качестве управляющих устройств применяют клапаны с пропорциональной или релейной характеристиками. Для привода клапанов обычно используют электропневматические устройства или шаговые двигатели. Для более точного управления, располагая клапанами со статической характеристикой и электропневматическим приводом, используют возможность изменения статизма системы с обратной связью по сигналу датчика перемещения клапана.

Обратная связь между результатами и регулированием рабочего процесса электронно-управляемого двигателя обеспечивается благодаря постоянному контролю состава ОГ датчиками (например, λ -зондами), установленными в выпускном тракте двигателя. Анализируя сигналы, поступающие с этих датчиков, ЭБУ способно корректировать топливоподачу с целью достижения наибольшей экологической безопасности и экономичности работы двигателя, а также управлять работой устройств нейтрализации вредных выбросов.

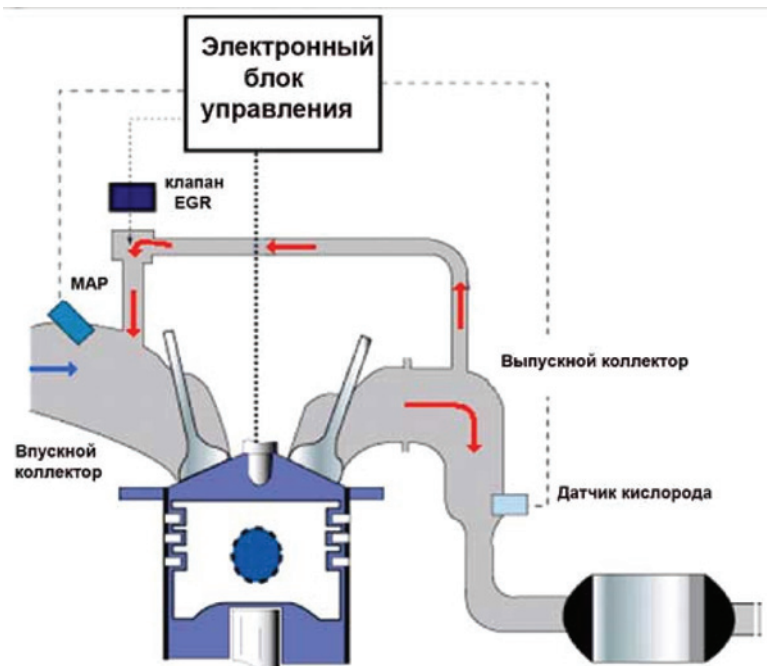


Рис. 6. Схема системы рециркуляции отработавших газов

Выводы

Обзор современной научно-технической литературы продемонстрировал направления совершенствования двигателей и их систем управления, развиваемые основными производителями:

- применение традиционных (низкого давления) систем топливоподачи с электронным управлением процессом впрыска топлива в цилиндры двигателя и систем топливоподачи высокого давления более сложного исполнения (CRS) и их модернизация для двигателей, работающих на различных видах топлива;
- создание и совершенствование систем управления фазами газораспределения, рециркуляцией отработавших газов и агрегатами турбонаддува;
- разработка систем в виде платформ, пригодных для оснащения двигателей различного назначения и мощности;
- формирование унифицированных программного и аппаратного обеспечения;
- создание быстродействующих электромагнитных устройств, сопутствующих исполнительных гидравлических систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boletis E. Benefits of propulsion integration on fuel efficiency of marine vessels / E. Boletis. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).
2. Foelzer K. H. Aspects of a Tier IV development for a multi-application high speed diesel engine / K. H. Foelzer, T. Kammerdiener, M. Zallinger [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).
3. Oestman F. Multi-Model adaptive wastegate control of a large medium-speed engine / F. Oestman, T. Kaas. — 2010. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).

4. *Oestman F.* A self-tuning engine concept / F. Oestman, T. Kaas. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).

5. *Ammer J.* Modular automation platform for efficient integration of new technologies and flexible adaption of customer requirements / J. Ammer, T. Brendle, R. Hirt. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 10.01.2014).

6. *Шишкин В. А.* Применение электронных информационных технологий при испытаниях судовых дизелей / В. А. Шишкин, М. Ю. Иванов, А. П. Петров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2006. — № 29. — С. 43–57.

7. *Starke F.* Caterpillars electronically controlled injection systems for medium speed engines / F. Starke, U. Hopmann // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1033–1039.

8. *Levchenko A.* Next generation of engine control systems / A. Levchenko. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm &CODE = 9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 10.01.2014).

9. *Rehbichler G.* The bosch electronic diesel control system for medium and high speed engines / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm &CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.07.2014).

10. *Tsujimoto K.* Development of Medium Speed EUP Electronically-Controlled Diesel Engines / K. Tsujimoto, T. Saeki, K. Kitagawa [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.07.2014).

11. *Liu G.* Machine Test on fuzzy-PID control strategy of diesel engine basing on Microautobox / G. Liu, E. Song, X. Zhu. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

12. *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.

13. *Kendlbacher C.* The 2200 bar modular common rail injection system for large engine diesel and HFO engines / C. Kendlbacher, T. Lengenfelder, D. Blatterer [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

14. *Sugihara M.* Creating a whole range of benefits with the Mitsubishi UEC eco-engine / M. Sugihara, K. Edo, T. Tanida. — 2007. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de /tecfinder/ faces/facelets/search /extended_search.jsp?APPL = cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB = cimc&SUBACC_1 = &SUBACC_0 = (дата обращения: 21.09.2014).

15. *Imanaka K.* Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine / K. Imanaka, N. Hiraoka, A. Miyanagi [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

16. *Шишкин В. А.* Развитие двухтактных малооборотных ДВС с электронным управлением / В. А. Шишкин, А. П. Петров, М. Ю. Иванов // Двигателестроение. — 2006. — № 2. — С. 26–31.

17. *Miller R. H.* The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics / R. H. Miller, H. U. Lieberherr // CIMAC Congress, 1957 Zurich, June 15 – 22. — 1957. — Pp. 787–803.

18. *Zappa G.* A 4-Stroke High Speed Diesel Engine with Two-Stage of Supercharging and Variable Compression Ratio / G. Zappa, T. Franca // 13th International Congress on Combustion Engines. — 1979. — Pp. D19–1.

19. *Edwards S. P.* The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications / S. P. Edwards, G. R. Frankel, F. Wirbeleit [etc]. // SAE Technical Paper, 1998. — № 980180.
20. *Stebler H.* Reduction of NOx Emissions of D.I. Diesel Engines by Application of the MillerSystem: An Experimental and Numerical Investigation / H. Stebler, G. Weisser, H. Hörler [etc]. // SAE Technical Paper, 1996. — № 960844.
21. *Noehre C.* Characterization of Partially Premixed Combustion / C. Noehre, M. Andresson, B. Johansson [etc]. // SAE Technical Paper, 2006. — № 2006-01-3412.
22. *Benajes J.* Advanced Injection Strategies to Attain Partially Premixed Combustion Process in a Heavy Duty Diesel Engine / J. Benajes, S. Molina, R. Novella [etc]. // SAE Technical Paper, 2008. — № 2008-01-0642.
23. *Segercrantz H.* MAN looks forward to next-generation diesel-electric power / H. Segercrantz // The Motor ship. — 2012. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/man-looks-forward-to-next-generation-diesel-electric-power> (дата обращения: 25.11.2014).
24. *Sailing towards IMO Tier 3* // The Motor ship. — 2011. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/sailing-towards-imo-tier-3> (дата обращения: 25.11.2014).
25. *Imperato M.* Multi-injection and advanced Miller timing in largebore CI engine / M. Imperato, J. Nurmiranta, T. Sarjovaara [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.11.2014).
26. *Jakobsen S. B.* Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines / S. B. Jakobsen, C. E. Egeberg. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.11.2014).
27. *Ципленкин Г. Е.* Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 16–22.
28. *Ципленкин Г. Е.* Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2014. — № 4. — С. 19–28.
29. *Kyrtatos P.* Recent developments in the Understanding of the Potential of In-Cylinder NOx Reduction though Extreme Miller Valve Timing / P. Kyrtatos, K. Hoyer, P. Obrecht [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 18.01.2015).
30. *Millo F.* Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine / F. Millo, M. G. Bernardi, E. Servetto [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 18.01.2015).
31. *Kaltoft J.* Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines / J. Kaltoft, M. Preem. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.03.2015).
32. *Higashida M.* Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NOx Regulation Tier III for twostroke diesel engine // M. Higashida, T. Nakamura, I. Onishi [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.03.2015).

DEVELOPMENT OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Introduction of norms of IMO Tier III in 2016 demands decrease in emissions of NOH with the fulfilled gases of engines for 75% in comparison with norms of IMO of the Tier II level. Reduction of emissions can be reached only by application of new technologies for ship diesel engines. To control emissions, without worsening profitability, these technology have to be directed on considerable improvement of parameters fuel - and air-supply of the engine.

The presented work is concentrated on consideration of the directions of application and development of electronic technologies of management for the purpose of creation of diesels with the flexible control systems possessing such advantages, which will allow providing observance of the specified international standards. These directions were widely presented on 25-27 the Congresses of the International council for internal combustion engines (CIMAC Congress). Achievements regarding development and application traditional (low pressure) systems of fuel feeding with electronic control of process of injection of fuel in cylinders of the engine and systems of fuel feeding of a high pressure of more difficult execution are shown. The offered technical aspects of realization of control of variable valve timing, exhaust gas recirculation and turbo-supercharging units are considered.

In each case it is expedient to use or local ways of control of the considered technologies, or their combination, i.e., using an integrated approach.

Key words: marine diesel, automatic control, electronic control system, control unit, fuel supply, fuel injection, air supply, turbocharging, valve timing, exhaust gases, recirculation.

REFERENCES

1. Boletis, Elias. "Benefits of propulsion integration on fuel efficiency of marine vessels." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
2. Foelzer, Karl-Heinz, Thomas Kammerdiener, Michael Zallinger, and Andrei Ludu. "Aspects of a Tier IV development for a multi-application high speed diesel engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
3. Oestman, F., and T. Kaas. "Multi-Model adaptive wastegate control of a large medium-speed engine." 2010. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
4. Oestman, Fredrik, and Tom Kaas. "A self-tuning engine concept." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
5. Ammer, Juergen, Thomas Brendle, and Roland Hirt. "Modular automation platform for efficient integration of new technologies and flexible adaption of customer requirements." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 10 January 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
6. Shishkin, V. A., M. Yu Ivanov, and A. P. Petrov. "The use of electronic information technologies in testing marine diesel engines." *Scientific and technical collection of Russian Maritime Register of Shipping* 29 (2006): 43-57.
7. Starke, F., and U. Hopmann. "Caterpillars electronically controlled injection systems for medium speed engines." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria* 2 (2007): 1033-1039.
8. Levchenko, Alexander. "Next generation of engine control systems." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 10 January 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
9. Rehbichler, Gerhard, Christoph Kendlbacher, and Martin Bernhaupt. "The bosch electronic diesel control system for medium and high speed engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 July 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
10. Tsujimoto, K., T. Saeki, K. Kitagawa, and Y. Takahata. "Development of Medium Speed EUP Electronically-Controlled Diesel Engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 July 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
11. Liu, Guodong, Enzhe Song, and Xiaohua Zhu. "Machine Test on fuzzy-PID control strategy of diesel engine basing on Microautobox." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.

12. Ivanov, M. Yu, V. A. Shishkin, and A. P. Petrov. "Modern medium and High-speed diesel engines with electronic control systems." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2006): 40–45.
13. Kendlbacher, Christoph, Thomas Lengenfelder, Dieter Blatterer, Martin Bernhaupt, and Christian Meisl. "The 2200 bar modular common rail injection system for large engine diesel and HFO engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
14. Sugihara, M., K. Edo, and T. Tanida. "Creating a whole range of benefits with the Mitsubishi UEC eco-engine." 2007. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
15. Imanaka, K., N. Hiraoka, A. Miyanagi, and M. Sugihara. "Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
16. Shishkin, V. A., A. P. Petrov, and M. Yu. Ivanov. "The development of low-speed two-stroke internal combustion engine with electronic control." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2006): 26–31.
17. Miller, R. H., and H. U. Lieberherr. "The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics." *CIMAC Congress, 1957 Zurich, June 15-22 (1957)*: 787–803.
18. Zappa, G., and T. Franca. "A 4-Stroke High Speed Diesel Engine with Two-Stage of Supercharging and Variable Compression Ratio." *13th International Congress on Combustion Engines* (1979): D19-1.
19. Edwards, S. P., G. R. Frankel, F. Wirbeleit, and A. Raab. *The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications*. No. 980180. SAE Technical Paper, 1998.
20. Stebler, H., G. Weisser, H. Hörler, and K. Boulouchos. *Reduction of NOx emissions of DI diesel engines by application of the Miller-system: an experimental and numerical investigation*. No. 960844. SAE Technical Paper, 1996.
21. Noehre, C., M. Andresson, B. Johansson, and A. Hultvist. *Characterization of partially premixed combustion*. No. 2006-01-3412. SAE Technical Paper, 2006.
22. Benajes, J., S. Molina, R. Novella, and S. Arthozoul. *Advanced Injection Strategies to Attain Partially Premixed Combustion Process in a Heavy Duty Diesel Engine*. No. 2008-01-0642. SAE Technical Paper, 2008.
23. Segercrantz, H. "MAN looks forward to next-generation diesel-electric power." *The Motor ship*. 2012. Web. 25 November 2014 <<http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/man-looks-forward-to-next-generation-diesel-electric-power>>.
24. "Sailing towards IMO Tier 3." *The Motor ship*. 2011. Web. 25 November 2014 <<http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/sailing-towards-imo-tier-3>>.
25. Imperato, Matteo, Jussi Nurmiranta, Teemu Sarjovaara, Martti Larmi, and Christer Wik. "Multi-injection and advanced Miller timing in largebore CI engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 November 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
26. Jacobsen, Stig Baungaard, and Carl-Erik Egeberg. "Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines." 2007. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 November 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
27. Tsipilenkin, G. E., and V. I. Iovlev. "Improving fuel efficiency by optimizing engine-supercharging systems." *Dvigatelsestroyeniye* 3 (2014): 16–22.
28. Tsipilenkin, G. E., and V. I. Iovlev. "Improving fuel efficiency by optimizing engine-supercharging systems." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2014): 19–28.
29. Kyrtatos, Panagiotis, Klaus Hoyer, Peter Obrecht, and Konstantinos Boulouchos. "Recent developments in the Understanding of the Potential of In-Cylinder NOx Reduction though Extreme Miller Valve Timing." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 18 January 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.

30. Millo, Federico, Marco Gianoglio Bernardi, Emanuele Servetto, and Diego Delneri. "Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 18 January 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

31. Kaltoft, Johan, and Mikkel Preem. "Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

32. Higashida, Masanori, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiro Yoshizawa, Hirotaka Takata, and Takamichi Hosono. "Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NOx Regulation Tier III for two-stroke diesel engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spb-engine-prof@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Aleksandr Pavlovich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
app.polab@inbox.ru
Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spb-engine-prof@mail.ru

УДК 62-83:629.1

**А. В. Саушев,
Д. И. Троян**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

В статье приводится анализ методов идентификации динамических систем применительно к электроприводам портовых перегрузочных машин. Показано, что электроприводы этих машин являются сложными электромеханическими системами, механическая часть которых содержит элементы с упругими связями и является многомассовой. Проанализированы особенности этих систем, требующие при решении задач моделирования и идентификации учета зазоров в зубчатых передачах; упругостей, возникающих в валах; изменение моментов инерции в зубчатых венцах; изменение жесткости упругих элементов в муфтах. Предложено использование принципа декомпозиции и выделение основных элементов электроприводов, подлежащих идентификации. На основе теории управления предложены методы идентификации элементов электроприводов портовых перегрузочных машин. Показано, что для этой цели возможно использование частотных методов и методов, работающих во временной области. Установлено, что перспективными являются методы активной идентификации на основе теории планирования эксперимента и статистические методы, основанные на разложении импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра.

Ключевые слова: идентификация, электропривод, портовые перегрузочные машины, метод.