

9. Azbuka proizvodstva. Chromatograficheskiy analiz gaza. URL: <https://stavropol-tr.gazprom.ru/press/news/2019/05/868/?mode=preview> (date of the application: 07.02.2020).
10. Kondrat'ev S.I. Maksimizaciya nadezhnosti processov v usloviyah mezhsistemnyh vzaimodejstvij s ne vpolne opredelennymi parametrami [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strategiya razvitiya transportno-logisticheskoy sistemy Azovo-CHernomorskogo bassejna. Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoj ekspluatatsii morskogo transporta Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i 6-j regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otvetstvennye za vypusk: akademik RAT, d.t.n., prof. V.V.Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof. V.E.Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.
11. Kondrat'ev, S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiyskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossiysk, 2004.
12. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst]/A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.

УДК 629.5.015

DOI: 10.34046/aumsuomt94/23

СОВРЕМЕННЫЕ СУДОВЫЕ МАЛОБОРОТНЫЕ ДИЗЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ

*С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор
А.В. Игнатенко*

История, перспективы и вызовы в развитии судовых малооборотных дизелей с электронным управлением. Аспекты, связанные с обеспечением мер по выполнению экологических требований ИМО Tier III, в том числе – переход на газообразное топливо, конструктивные особенности оборудования систем обработки выпускных газов. Связанное оборудование и системы управления. Отмечены проблемы силовой гидравлической системы данных дизелей, связанные с появлением износов в элементах и падением давления в системе. Рассмотрены методы восстановления прецизионных пар данной системы, с целью повышения показателей надежности пропульсивных установок в целом.

Ключевые слова: малооборотные дизели, электронное управление, эксплуатация, перспективы, газообразное топливо, проблемы, отказы, гидравлическая система, утечки, восстановление

The review of current state and potential prospects: electronically controlled low speed marine diesel engines, including development, up-to-date challenges and future potential. IMO Tier III related features and issues: achieving compliance requirements, transition to gas fuels. Alterations in the equipment and the control systems reviewed. Engines hydraulic power system (HPS) equipment wear related problems highlighted. The reconditioning methods for the precision pairs reviewed as a part of a process to increase propulsion plants reliability.

Keywords: low speed diesel engines, challenges, electronic control, operation, prospects, gas fuel, problems, failures, hydraulic system, leakage, reconditioning.

Первый опыт практической реализации главных судовых малооборотных дизелей (МОД) с электронным управлением фирмы MANB&W впервые был представлен на конгрессе CIMAC (англ. - *The International Council on Combustion Engines*) в 2001 г. Прототипом стал главный двигатель (ГД) танкера «Bow Cecil» норвежского судовладельца «Odffell ASA» модели 6L60ME с цилиндровой мощностью 1920 кВт, частотой вращения 123 мин⁻¹, средним эффективным давлением 17,0 бар и следующими параметрами цилиндра: диаметр – 600 мм, ход поршня – 1944 мм.

Конструкция МОД серии ME, в основном, схожа с конструкцией серий MC или MC-C: детали остова, коленчатый вал, элементы цилиндропоршневой группы – идентичны, а существенным отличием является принципиально

иной подход, реализованный для управления системой газораспределения и топливной аппаратурой.

В большинстве двигателей такого типа распределительный вал отсутствует – его функции выполняет микропроцессорная система управления (МПСУ), которая на основе входного сигнала от «тахо-системы» с электронными датчиками (энкодерами) положения коленчатого вала (ПКВ) дизеля и с учетом выбранного режима работы формирует управляющие воздействия для:

– топливных насосов высокого давления (ТНВД), задавая закон подачи топлива в функции угла ПКВ, определяя момент начала подачи топлива в цилиндр и цикловую подачу топлива;

– управления открытием и закрытием выпускного клапана.

Также, при пуске дизеля, МПСУ формирует управляющее воздействие, определяющее порядок, моменты и длительность открытия пусковых клапанов цилиндров, выполняя, таким образом, функции распределителя пускового воздуха. При работе ГД система управления интегрирована с системой цилиндровой смазки и также, в функции угла ПКВ, формирует управляющее воздействие в лубрикатеры. Дополнительно МПСУ обеспечивает управление необходимым вспомогательным оборудованием – вспомогательными

воздухонагнетателями и насосами силовой гидравлической системы (СГС), обеспечивающей гидравлическую часть системы управления дизеля рабочей средой (маслом) под высоким давлением. Структура системы управления главных судовых МОД типа MANME [1] приведена на рисунке 1.

Краткие сведения о терминологии и назначении основных элементов МПСУ приведены в таблице 1, а структура системы приведена на рисунке 2.

Количество судовых дизельных двигателей ME по состоянию на 2006-2007 года приведено в таблице 2.

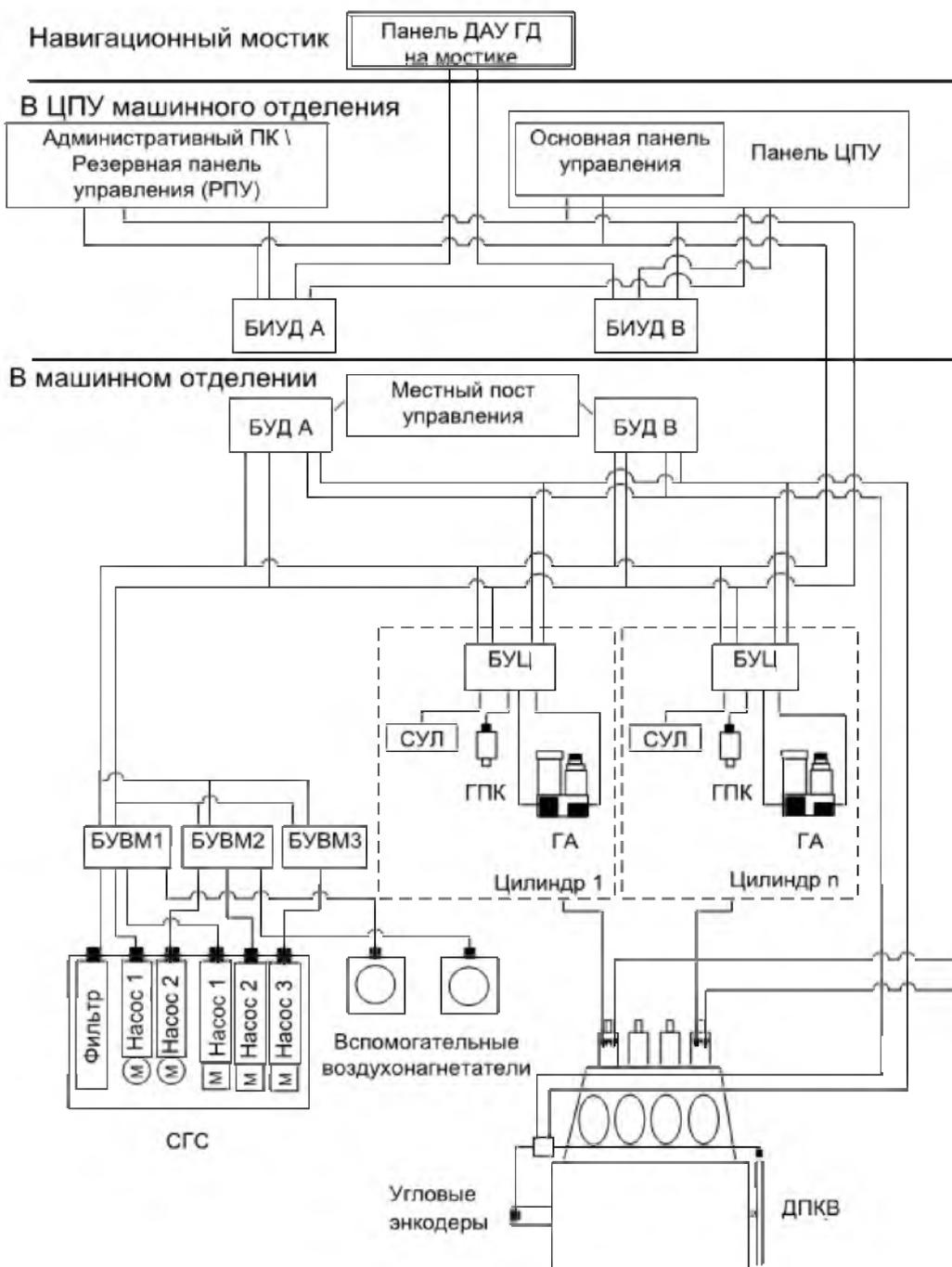


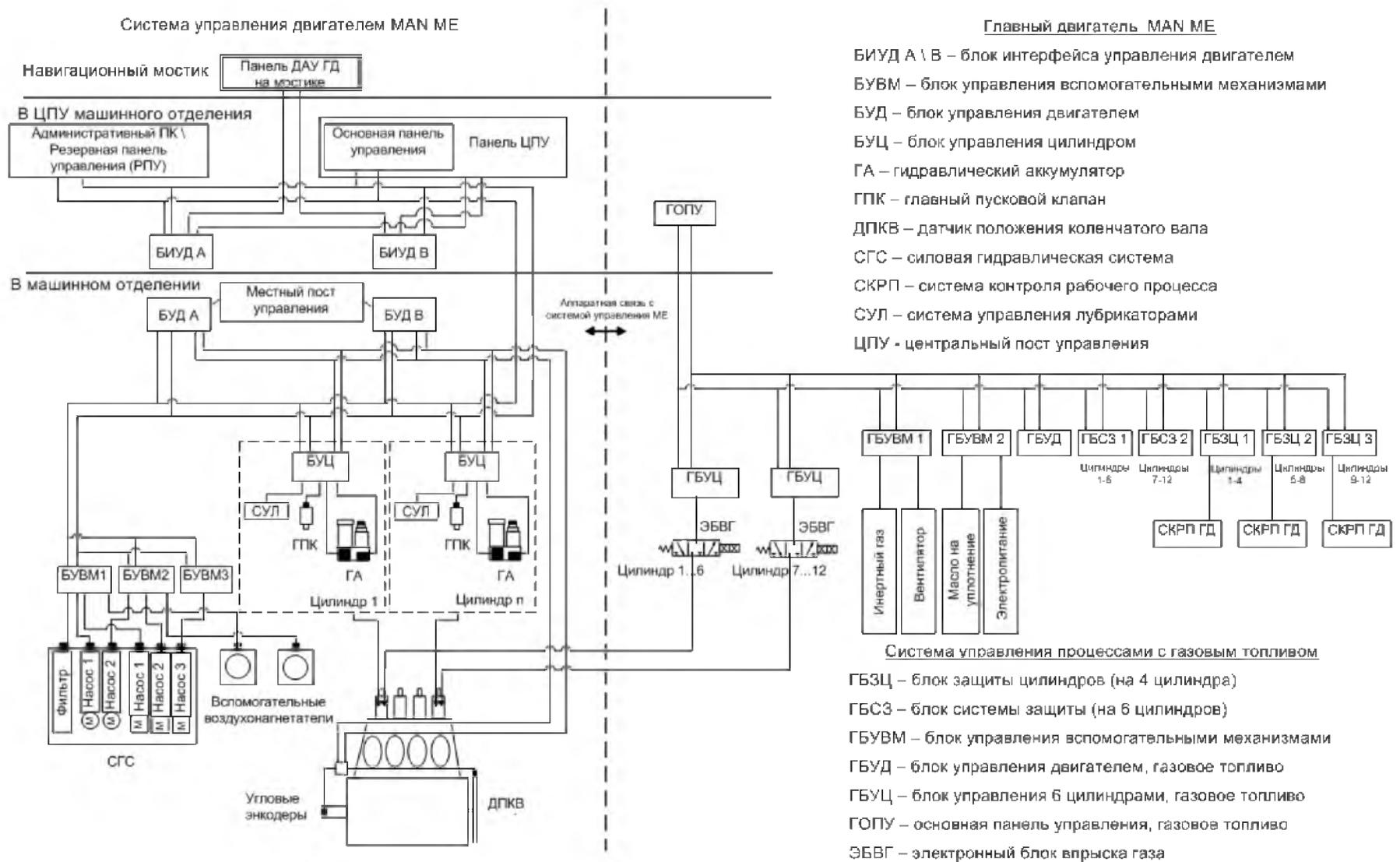
Рисунок 1 – Структура системы управления главных судовых МОД типа MAN ME

Таблица 1 – Компоненты МПСУ главного МОД типа MAN ME

Наименование компонента 1	Англоязычный термин 2	Примечание / Назначение 3
Панель ДАУ ГД на мостике	<i>BRIDGE PANEL</i>	Часть системы дистанционного автоматического управления ГД
Основная панель управления (ОПУ)	<i>MAIN OPERATION PANEL - MOP</i>	Используется в качестве основного поста управления ГД: команды управления на двигатель, регулировка параметров, выбор режима работы, контроль состояния системы управления
Административный ПК \ Резервная панель управления (РПУ)	<i>ADMINISTRATION PC BACK-UP FOR MOP</i>	Резерв основной панели, сервер данных, функции администрирования
Панель ЦПУ	<i>ECR PANEL</i>	Панель управления в центральном посту управления судовой энергетической установкой
БУД – Блок управления двигателем	<i>ECU - Engine Control Unit</i>	Обеспечивает изменение режима работы ГД, программы управления. Выполняет функции РЧВ ГД, пуск и остановку, управляет топливopодачей, выпускными клапанами, пусковыми клапанами. Посредством связи с БУВМ осуществляет управление вспомогательным оборудованием. Обеспечивает интерфейс с системой защиты ГД
БИУДА \ В – Блок интерфейса управления двигателем	<i>EICU A \ B - Engine Interface Control Unit</i>	Обеспечивают связь МПСУ с другими системами автоматизации: системой АПС, системой ДАУ ГД и др.
БУВМ – Блок управления вспомогательными механизмами	<i>ACU - Auxiliary Control Unit</i>	Управление насосами СГС, нагнетателями, другими блоками
БУЦ – Блок управления цилиндром	<i>CCU - Cylinder Control Unit</i>	В соответствии с командами от блока ECU управляет в функции угла ПКВ впрыском топлива в цилиндр, подачей масла через лубрикаторы цилиндрической смазки и открытием выпускного клапана
СГС – Силовая гидравлическая система	<i>HPS - Hydraulic Power Supply</i>	Обеспечивает рабочей жидкостью высокого давления
ДПКВ – датчик положения коленчатого вала	<i>CPS - Crankshaft Position Sensors</i>	Датчики угла ПКВ
СУЛ – система управления лубрикаторами	<i>ALS - Alpha Lubricator System</i>	Обеспечивает автоматическую подачу цилиндрической смазки
МПУ - Местный пост управления	<i>LOP - Local Operation Panel</i>	Аварийное управление ГД из машинного отделения
Насос гидравлики СГС 1 (2, 3)	<i>PUMP 1, 2, 3</i>	Насосы рабочей жидкости СГС – с электрическим приводом и приводом от ГД (навешенные)
Фильтр	<i>Filter</i>	Фильтр рабочей жидкости СГС
Вспомогательный воздуходогагнетатель 1 (2)	<i>AUXILIARY BLOWER 1</i>	Обеспечение давления воздуха наддува на малых ходах
Угловые энкодеры	<i>Angle Encoders</i>	Датчики тахо-системы
ГА – гидравлический аккумулятор	<i>HCU – Hydraulic Control Unit</i>	Резерв / давление рабочей жидкость СГС
ГПК – главный пусковой клапан	<i>SAV - Starting Air Valve</i>	

Таблица 2 – Количество судовых дизельных двигателей ME по состоянию на 2006-2007 г.

Тип дизеля	2006	01.2007
K98ME	3	11
K98ME-C	4	11
S90ME-C	2	2
K80ME-C		1
S70ME-C	12	16
L70ME-C	3	5
S65ME-C		3
S60ME-C	16	23
L60ME	1	
S50ME-C	8	9
L42ME/MS	1	1
Всего	50	82



Основной причиной разработки нового подхода к управлению главных судовых МОД послужило поэтапное ужесточение требований,

направленных на снижение вредных выбросов в атмосферу. В таблице 3 приведены нормы и этапы изменения требований.

Таблица 3 – Предельные нормы выбросов окислов азота с судов в атмосферу

Дата постройки судна / IMO Tier	Предельная норма выбросов (г/кВт·ч) NO _x n = номинальная частота вращения ГД (мин ⁻¹)		
	n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
1 January 2000/ I	17.0	45 · n ^(-0.2) Пример для 720 rpm – 12.1	9.8
1 January 2011/ II	14.4	44 · n ^(-0.23) Пример для 720 rpm – 9.7	7.7
1 January 2016 / III	3.4	9 · n ^(-0.2) Пример для 720 rpm – 2.4	2.0

Ужесточение экологических требований до уровня IMO Tier III по выбросам окислов азота в зонах с контролем выбросов (англ. ECA – Emission Control Areas) с 14,3 до 3,4 г/кВт·ч (более чем

в 4 раза – таблица 3, рисунок 3) для МОД привело к необходимости создания новых систем в конструкциях этих дизелей [1, 2, 3].

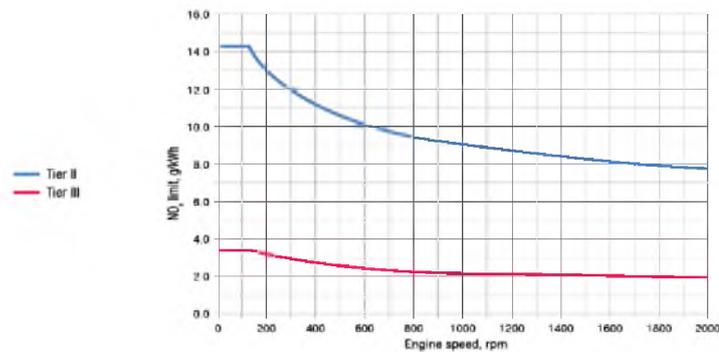


Рисунок 3 – Нормы выбросов, установленные IMO для дизельных двигателей в зависимости от номинальной частоты вращения

Это также отражено в марке дизеля (например, дизель 11G90ME-C9-GI-EGRTC): EGR – рециркуляция выпускных газов (РВГ) и SCR – селективное каталитическое восстановление (СКВ), при котором восстанавливающий агент вводится в выхлопной газ через катализатор. Системы РВГ подразделяются на два типа: EGRBP – EGR с байпасным механизмом, применяемые для двигателей с одним турбоагнетателем (ГТН) и диаметром цилиндра до 70 см, EGRTC – EGR с

контролем дополнительных ГТН. Системы СКВ подразделяются на системы высокого (HPSCR) и низкого давления (LPSCR). Пример системы РВГ с одним турбоагнетателем и его байпасным механизмом приведен на рисунке 4. Введение указанных компонентов потребовало соответствующих изменений в системе управления – появления дополнительных блоков управления наддувом – SCU (scavenge air control unit).

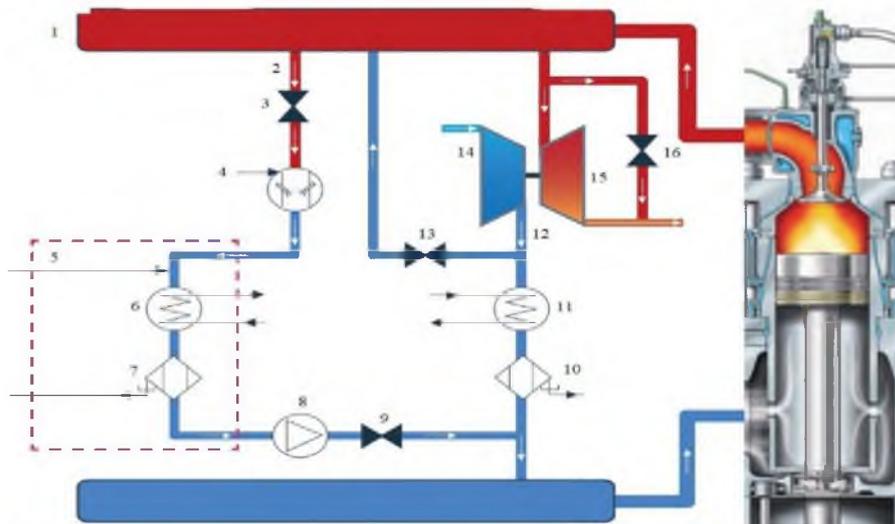


Рисунок 4 – Система РВГ (EGR) с байпасом основного турбокомпрессора

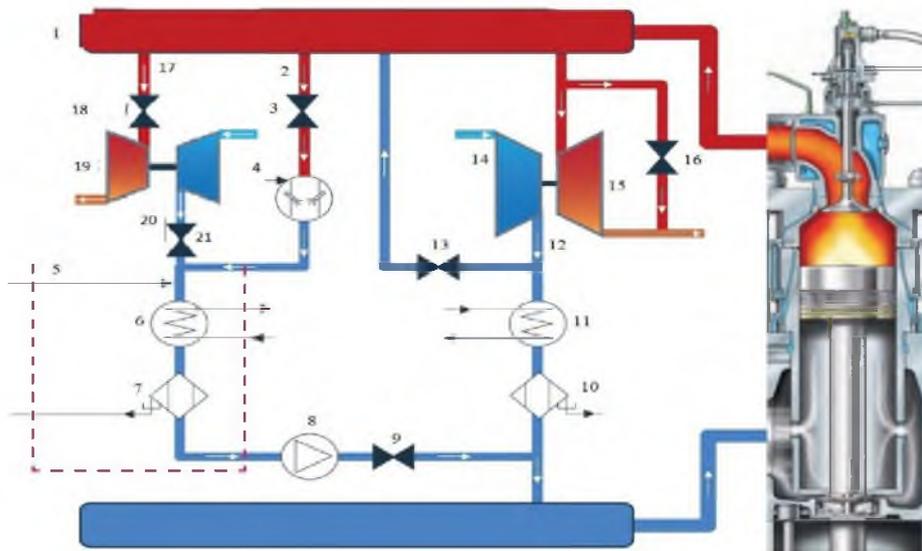


Рисунок 5 – Система РВГ с согласующим байпасом:

1 – выпускной коллектор; 2 – поток ВГ на рециркуляцию (до 40%); 3 – отсечной клапан (SOV – Shut-offvalve); 4 – предварительный распыл; 5 – распыл на охладитель; 6, 11 – охладители; 7, 10 – уловитель водяного тумана (WMC – watermistcatcher); 8 – нагнетатель РГ (газа из линии рециркуляции); 9 – дросселирующий клапан; 12 – основной поток наддува; 13 – байпас компрессора – поток воздуха в цилиндр (CBV – cylinderbypassvalve); 14 – Основной ГТН; 15 – компрессор; 16 – байпасный клапан ВГ помимо турбины; 17 – поток ВГ на рециркуляцию через дополнительный ГТН (19); 18 – отсечной клапан; 20 – дополнительный поток наддува; 21 – отсечной клапан



EGR

SCR – HP

SCR - LP

Рисунок 6 – Общий вид компоновки МОД типа ME при схемах технологии TierIII:

а – рециркуляция выпускных газов, б – селективное каталитическое восстановление, при котором восстанавливающий агент вводится в выпускной газ через катализатор при высоком давлении, в – тоже при низком давлении

Перевод судовых МОД на газ ведущие фирмы дизелестроители MANB&W и Wartsila начали в конце XX века [3, 4], в настоящее время этот процесс продолжается и для МОД типа SME и GME с электронным управлением [2, 3, 4]. Ряд преимуществ, свойственных газообразному топливу, пока не имеет достаточно убедительных результатов исследований и наблюдений в эксплуатационных условиях: это касается как экономических показателей, так и тепловой напря-

женности МОД, износов деталей цилиндропоршневой группы, а также безопасности – при наличии больших объемов газа на борту судна и в топливной системе главных дизелей. Все эти вопросы представляют большой интерес для фирм-дизелестроителей, судовладельцев, а также для судовых механиков с точки зрения их теоретической и практической подготовки для эксплуатации этих МОД.

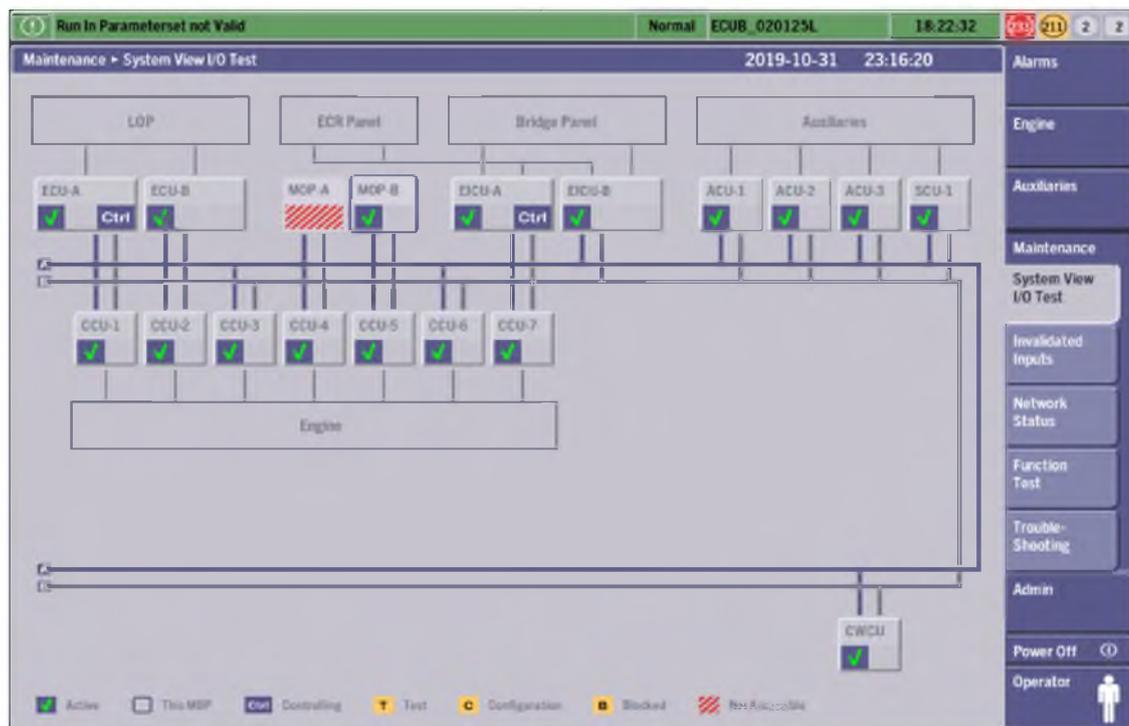


Рисунок 7 – Видеокадр панели управления (MOP) двигателя ME с EGR

Гребные установки при работе МОД на ТТ и газе следует подразделять на 2 типа: с топливными системами, использующими газ из грузовой системы, и установки с автономными топливными системами, использующими газ, принятый в процессе бункеровки, как правило, с дополнительной криогенной установкой.

Развитие данного направления в конструкции судовых малооборотных дизелей (МОД) происходит достаточно длительное время с конца 20 века, когда на танкера-газовозы начали устанавливать главные дизели, работающие на тяжелом топливе и на газе, например, типа 12K80MC-GI и несколько позже с электронным управлением – 7S65ME-C-GI.

Гребные установки при работе МОД на ТТ и газе следует подразделить на 2 типа: с топливными системами, использующими газ из грузовой системы, и установки с автономными топливными системами, использующими газ, принятый в процессе бункеровки (как правило, с дополнительной криогенной установкой).

Одновременно с этим, ужесточение экологических требований уровня III (IMO Tier III) по выбросам окислов азота в зонах ECA (*Emission-Control Areas*) с 14,3 до 3,4 г/кВт·ч (более чем в 4 раза, см. рисунок 3) для МОД привело к необходимости создания новых систем в конструкциях этих дизелей [1, 2], что также отражено в марке дизеля (приведено выше).

Перевод судовых МОД на газ ведущие фирмы дизелестроители MANB&W и

Wartsilаначали в конце XX века [3, 4], в настоящее время этот процесс продолжается и для МОД типа SME и GME с электронным управлением [2, 3, 4]. Ряд преимуществ, свойственных газообразному топливу, пока не имеет достаточно убедительных результатов исследований и наблюдений в эксплуатационных условиях: это касается как экономических показателей, так и тепловой напряженности МОД, износов деталей цилиндропоршневой группы, а также безопасности – при наличии больших объемов газа на борту судна и в топливной системе главных дизелей. Все эти вопросы представляют большой интерес для фирм-дизелестроителей, судовладельцев, а также для судовых механиков с точки зрения их теоретической и практической подготовки для эксплуатации этих МОД.

Гребные установки при работе МОД на ТТ и газе следует подразделить на 2 типа: с топливными системами, использующими газ из грузовой системы, и установки с автономными топливными системами, использующими газ, принятый в процессе бункеровки (как правило, с дополнительной криогенной установкой).

По состоянию на октябрь 2018 года в эксплуатации находилось 55 судов с подобными двигателями от MAN и еще 244 главных двигателя были заказаны судовладельцами для вновь строящихся судов до 2023 года (таблица 4).

Одной из основных проблем МОД с электронным управлением является снижение давления в силовой системе гидравлики управления

газораспределения, что является следствием износов в прецизионных парах (ПП), образуемых гидравлическими насосами (рисунок 8), приводами выпускных клапанов (рисунок 10), топлив-

ными насосами высокого давления и лубрикаторов (рисунок 9), а также многочисленными золотниками, соленоидными клапанами и соединительными трубопроводами.

Таблица 4 – Двигатели MAN семейства GI – в эксплуатации и будущих проектов

Количество	Тип	D _ц	Модель	Mк
5	S	90	ME-C-GI	10.5
12	G	90	ME-C-GI	9.5, 10.5
4	S	80	ME-C-GI	9.5
6	S	70	ME-C-GI	7, 8.2, 10.5
148	G	70	ME-C-GI	9.2, 9.5, 10.5
5	L	70	ME-C-GI	8.2
2	S	60	ME-C-GI	10.5
8	S	50	ME-C-GI	8.2, 9.5
5	G	50	ME-C-GI	9.5
4	G	45	ME-C-GI	9.5
11	S	50	ME-C-GI	9.3, 9.5, 10.5
3	S	50	ME-B / ME-C-LGIM	9.3
18	G	60	ME-C-GIE	9.5
3	G	50	ME-C-GIE	9.5
10	G	60	ME-C-LGIP	10.5

Через определенную наработку МОД (через 8-10 лет) проявляются повышенные износы в указанных парах трения, что существенно снижает давление гидравлики в силовой системе. Это приводит к снижению живучести дизелей в целом и необходимости срочных мер по восста-

новлению герметичности данных систем. По данным фирмы MANB&W бустерные насосы топливных насосов имеют ресурс 48 тыс. часов (примерно 10 лет эксплуатации). Для ТА это значение значительно меньше – 16 тыс. часов.

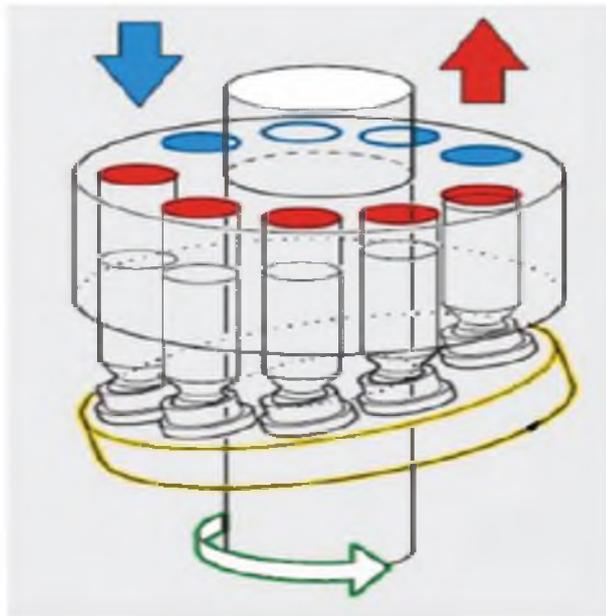


Рисунок 8 – Насос гидравлической системы двигателя типа ME фирмы MAN B&W

Главный гидравлический насос является центральным компонентом СГС двигателя ME. Эксплуатация позволила получить, в целом, удовлетворительные результаты – когда интервалы капитального ремонта приблизились к отметке в 32000 часов. Такой ресурс насоса СГС по порядку сопоставим со сроком службы самого двигателя,

однако в процессе эксплуатации проявились следующие особенности.

Изначально были выбраны гидравлические насосы, производимые компанией «BoschRexroth». Несколькими годами позже, наряду с насосами от указанного выше производителя, добавились насосы от «EatonHydrokraft», что, в первую очередь, было обосновано стремлением дизелестроителя

иметь альтернативу основному поставщику и сравнить указанные элементы СГС в эксплуатации. Насосы от «EatonHydrokraft» показали в эксплуатации две основные проблемы в следующих областях:

- отказы датчика обратной связи для наклонной шайбы (англ. «swashplate»)
- отказы непосредственно самой наклонной шайбы

Износ ПП, особенно топливной аппаратуры (ТА) – распылителей форсунок и плунжерных пар ТНВД, достаточно хорошо изучен и разработаны и используется разнообразные методы и способы увеличения их ресурсов, а также повышения их долговечности при восстановлении с использованием современных технологических методов [2].

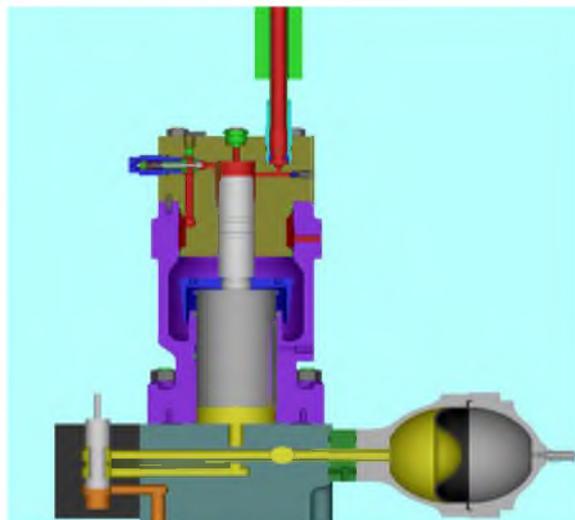


Рисунок 9 – Привод ТНВД МОД типа ME (3 прецизионные пары: плунжер топлива, плунжер гидравлического привода и золотник управления)

Проблема износов в СГС сложна тем, что достаточно много точек в МОД, где возможны утечки, и сложность в поиске конкретного узла или узлов, особенно для многоцилиндровых дизелей. К тому же, обнаружение дефектных ПП и их замена (восстановление в судовых условиях практически исключено) является также определенной проблемой.

В условиях специализированных предприятий (или участков СРЗ) восстановление ПП рассматриваемой гидравлической системы возможно аналогично таким деталям ТА [2]. В таком случае следует рассматривать все ранее рассматриваемые методы восстановления ПП, т. е.

- переукомплектование однотипных деталей;
- изготовление новых деталей (одной из изношенных);
- термический (нагрев до 225-230 °С в масляной среде для аустенитно- мартенситного превращения и роста кристаллов);
- нанесение износостойких покрытий, например, нитрида титана (TiN).

Наиболее перспективным методом из приведенных при работе МОД на тяжелом топливе (ТТ) является последний (4) – нанесение износостойких покрытий, что дает возможность восстанавливать зазоры и, одновременно, повысить ресурс деталей [2]. Однако это исключается для выполнения на судах, а требуется специализированное оборудование на СРЗ.

При нанесение износостойких покрытий следует рассматривать несколько способов:

- пористое хромирование;
- композиционное гальваническое покрытие;
- хром-алмазное покрытие;

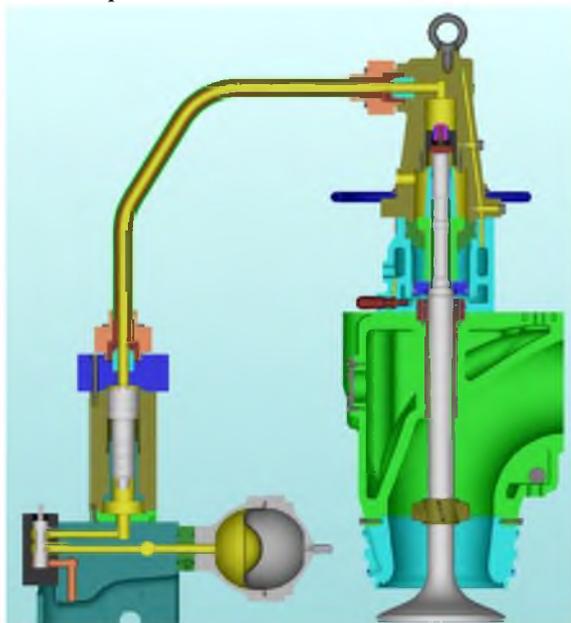


Рисунок 10 – Гидравлический привод выпускного клапана МОД типа ME

– ионно-плазменное (ИПП) напыление (TiN).

Пористое хромирование получило широкое применение при восстановлении ПП, благодаря свойствам и преимуществам:

– хорошая прирабатываемость к различным сопряженным не хромированным поверхностям;

– более низким коэффициентом трения пары «пористый хром-сталь» по сравнению с парой «сталь-сталь» - в среднем на 10%;

– хорошее сцепление с основным металлом при толстых слоях вследствие значительного уменьшения внутренних напряжений в остатках пористого хрома, исключающих возможность скалывания и выкрашивания хрома при механической обработке хромированной поверхности и при работе трущихся деталей;

– высокая износостойкость при повышенных давлениях и температуре (до 500 °С в агрессивных средах);

– высокая теплопроводность, способствующая поддержанию низкой температуры поверхности трения, благоприятно влияющая на качество смазки и отвод тепла.

Повышенная твердость электролитического хрома (800-900 HV) объясняется искажением кристаллической решетки вследствие внутренних напряжений и внедрения водорода.

Износостойкость хромового покрытия, в среднем, на 21 % выше, чем стали ХВГ после закалки. Однако износостойкость зависит нагрузки и толщины слоя покрытия: стойкость увеличивается по мере снижения нагрузки и существенно – при увеличении толщины покрытия. При толщине менее 10 мкм покрытие обладает низкой износостойкостью, а оптимальной толщиной следует считать покрытия 30 мкм и более.

При введении порошкообразных веществ в электролиты становится возможным совместное осаждение металла и находящихся в растворе частиц, т. е. формирование композиционных покрытий с улучшенными свойствами (твердостью, износостойкостью, термостойкостью и т. п.). Особый интерес в качестве модификаторов композиционных гальванических покрытий представляют ультрадисперсные алмазы (УДА), которые позволяют одновременно обеспечить комплекс высоких эксплуатационных характеристик деталей с композиционным покрытием. Дисперсность первичных микрокристаллов (природного или синтетического алмаза) составляет 4-6 нм. Композиционное покрытие получают электролитическим осаждением из суспензии, представляющей собой стандартный элек-

тролит хромирования с добавкой определенного количества дисперсного наполнителя, при режимах блестящего хромирования.

Хромо-алмазные покрытия имеют толщины от 0,5 до 500 мкм в зависимости от их назначения. Микронапряжения в покрытии составляют 1,8-1,9 ГПа. В зависимости от режима осаждения покрытий их микротвердость может изменяться в широких пределах (среднее значение составляет 12000-14000 МПа), при этом достигается износостойкость в 2-3 раза больше, чем у покрытий без УДА. Применение УДА позволяет получить композиционные хромовые покрытия, обладающие более высокой твердостью (на 15-30 %) по сравнению с хромовыми. Хромо-алмазное покрытие работоспособно в режиме трения при граничной смазке в диапазоне нагрузок от 0,65 до 4,5 МПа, при этом износ снижается в 1,5-3,0 раза, а коэффициент трения на 10-20 %.

Износостойкость хромо-алмазных покрытий находится на уровне нитрида титана при более высокой прочности сцепления с основой и меньшим коэффициентом трения. Энергозатраты на процесс в 2-4 раза ниже, чем при нанесении покрытий из нитрида титана, не требуется сложной вакуумной техники и не происходит отпуск закаленных сталей.

Для нанесения TiN -покрытий на поверхности ПП используется метод ионно-плазменного осаждения тугоплавких соединений, синтезирующихся в парогазовой фазе с ионной бомбардировкой (метод КИБ). Нанесение покрытий производится на промышленной установке ННВ-6.6. данная установка предназначена для нанесения упрочняющих одно и многослойных покрытий на рабочие поверхности деталей диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм. Перспективными по износостойкости являются ионно-плазменные покрытия (ИПП) на основе молибдена и титана, наносимые в среде азота. При этом твердость нанесенного слоя составляет: для Mo – 960-990 HV₁₀₀ и для TiN – 2800-3200 HV₁₀₀.

Сравнительные испытания покрытий на износ показали, что покрытия из TiN уменьшают в 5-8 раз износ деталей, снижают коэффициент трения скольжения в ПП «сталь- покрытие» на 30-50 % при их эксплуатации при температурах до 200 °С, нагрузках 80-200 МПа и скорости 0,5-1,5 м/с.

Толщина и твердость наносимого слоя существенно влияет на адгезионные свойства покрытий, с увеличением толщины и твердости покрытия адгезионная прочность уменьшается вследствие повышения величины остаточных

напряжений растяжения в слое. Так при толщине покрытия TiN 4-5 мкм прочность превышает 66 МПа, которая с ростом толщины постепенно понижается и при толщине 25-30 мкм адгезионная прочность составляет около 50 МПа. Дальнейшее повышение толщины покрытия приводит к самопроизвольному отслоению TiN.

При использовании всех перечисленных методов восстановления ПП важным фактором является разработка рационального сочетания предварительной механической обработки (восстановление геометрической формы поверхности детали), технология нанесения покрытия и его финишная механическая обработка [2].

В условиях трения ПП оптимизация несущей способности будет обладать композиция слоев на поверхности детали: приработочный слой, износостойкий (упрочненный) слой; переходной слой, сердцевина (основа) детали.

В заключении следует отметить следующее:

- 1) развитие перспективных МОД с электронным управлением, работающих на тяжелом топливе и на газе, привело к более сложным их конструкциям, что резко увеличивает число их элементов и, со временем, снижает вероятность безотказной работы в связи с появлением износов в СГС;
- 2) повышение экономичности этих дизелей, особенно при парциальных мощностях, значительное облегчение технического использования при наличии систем автоматики и диагностики (система CoCos), улучшение экологических проблем (с возможностью выполнения требований IMOTierIII) и использование газа даёт, несомненно, положительный эффект;
- 3) определённые проблемы вызывают износы ПП в силовой гидравлической системе, что приводит к снижению давления в ней и потенциально к повышению вероятности отказов МОД, а также к необходимости восстановления этих пар или замене новыми деталями (узлами в целом);
- 4) восстановление изношенных деталей ПП возможно с использованием современных технологий, о которых упомянуто в данной статье (только в условиях специализированных предприятий или участков СРЗ);
- 5) рациональность восстановления изношенных деталей ПП или замена их новыми должна базироваться на результатах тщательных экономических расчетах.

Литература

1. MAN B&W Two-stroke Marine Engines Emission Project guide. MAN Energy Solutions. 2018 – 111p.
2. Taufiq Chogle. 7 Ways For Ships To Meet MARPOL NOx Tier III Regulation [Электронный ресурс] <https://www.marineinsight.com/tech/different-ways-meet-nox-tier-iii-standards/>
3. Худяков С.А. Особенности дизелей фирмы MANB&W серии ME-GI и их топливной системы / С.А. Худяков, В.А. Башкатов //Эксплуатация морского транспорта.– 2018.– № 2 (83), – С.107- 114.
4. Худяков С.А. Системы подвода газа для дизелей фирмы MANB&W серии SME-GI / С.А. Худяков, В.А. Башкатов //Эксплуатация морского транспорта.– 2018.– № 3 (88). – С.81- 86.
5. Епифанов В.С. Эксплуатация судовых энергетических установок на природном газе / В.С. Епифанов. – М.: ТрансЛит, 2010. –212 с.
6. IMO FAQ for IMO regulations to reduce air pollution from ships and the review of fuel oil availability, September 2016.
7. MAN B&W. Two-Stroke Marine Engines. Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations. 9 Edition. 2018. – 108 p.
8. The 4T50ME-GI Test Engine at MAN Diesel & Turbo's Copenhagen Test Centre, Printed in Denmark MAN Diesel & Turbo Tegholmsgade Copenhagen SV, Denmark, Feb. 2011.
9. MAN B&W 70-60 ME-GI/-C-GI-TII Type Engines Engine Selection Guide, 1st Edition, June 2010, MAN Diesel & Turbo, branch of MAN Diesel & Turbo SE, Germany.
10. Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования. В 3-х т. Т.3. Восстановление и упрочнение деталей. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, Дальнаука, 2005. – 356 с.
11. Лашко В.А. (2014). Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС// Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ».–2014.–, Том 5.– № 1,–С. 260 – 287.
12. O. Grone. ME-GI dual fuel engine: The LNG carrier two-stroke solution. Pressrelease. Copenhagen, 13 January, 2004. (MAN B&W Diesel A/S launches the ME-GI engine).
13. MalcolmLatarche [Электронный ресурс] <https://shipinsight.com/articles/man-b-w-dual-fuel-engines-pass-major-milestone>
14. TrevorBrown [Электронный ресурс] <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>
15. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых энергоэнергетических систем. (Часть 1) [Текст] /А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хе-

керт//Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 3 (84).– С. 89-99.

16. Кондратьев С.И., Печников А.Н., Хекерт Е.В. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: суть проблемы и подход к ее решению// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 4-4 (42).– С. 166-174.

REFERENCES

1. MAN B&W Two-stroke Marine Engines Emission Project guide. MAN Energy Solutions. 2018 – 111p.
2. Taufiq Chougle. 7 Ways For Ships To Meet MARPOL NOx Tier III Regulation [Elektronnyj resurs] <https://www.marineinsight.com/tech/different-ways-meet-nox-tier-iii-standards/>
3. Hudyakov S.A. Osobennosti dizelej firmy MAN B&W serii ME-GI i ih toplivnoj sistemy / S.A. Hudyakov, V.A. Bashkatov. Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 2 (83), 2018. – Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.107- 114.
4. Hudyakov S.A. Sistemy podvoda gaza dlya dizelej firmy MAN B&W serii SME-GI / S.A. Hudyakov, V.A. Bashkatov. Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 3 (88), 2018. – Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.81- 86.
5. Epifanov V.S. Ekspluatatsiya sudovyh energeticheskikh ustanovok na prirodnom gaze / V.S. Epifanov // . – M.: TransLit, 2010. –212 s.
6. IMO FAQ for IMO regulations to reduce air pollution from ships and the review of fuel oil availability, September 2016.
7. MAN B&W. Two-Stroke Marine Engines. Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations. 9 Edition. 2018. – 108 p.
8. The 4T50ME-GI Test Engine at MAN Diesel & Turbo's Copenhagen Test Centre, Printed in Denmark MAN Diesel & Turbo Teglhølmegade Copenhagen SV, Denmark, Feb. 2011.
9. MAN B&W 70-60 ME-GI/-C-GI-III Type Engines Engine Selection Guide, 1st Edition, June 2010, MAN Diesel & Turbo, branch of MAN Diesel & Turbo SE, Germany.
10. Leont'ev L.B. Povyshenie nadezhnosti sudovogo oborudovaniya. V 3-h t. T.3. Vossta-novlenie i uprochnenie detalej. – Vladivostok, Mor. gos. un-t, Dal'nauka, 2005. – 356 s.
11. Lashko V.A. (2014). Perspektivy razvitiya intellektual'nyh porshnevnyh DVS. Elek-tronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU» 2014, Tom 5, № 1, S. 260 – 287.
12. O. Grøne. ME-GI dual fuel engine: The LNG carrier two-stroke solution. Pressrelease. Copenhagen, 13 January, 2004. (MAN B&W Diesel A/S launches the ME-GI engine).
13. Malcolm Latache [Elektronnyj resurs] <https://shipinsight.com/articles/man-b-w-dual-fuel-engines-pass-major-milestone>
14. Trevor Brown [Elektronnyj resurs] <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>
15. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 3 (84). S. 89-99.
16. Kondrat'ev S.I., Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovyh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-4 (42). S. 166-174

УДК 621.3.01(076)

DOI: 10.34046/aumsuomt94/24

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

*А. Б. Каракаев, доктор технических наук, профессор,
А. В. Костенко, аспирант*

Для выявления и изучения основных закономерностей магнитных процессов однофазных асинхронных двигателей (ОАД) с целью создания работоспособной методики его проверки необходимо иметь математическую модель, в которой выходные показатели непосредственно связаны с параметрами. Однако, использование общеизвестных уравнений для токов и моментов, представляется затруднительным ввиду сложности и громоздкости. Целесообразнее заменить сложную математическую модель более простым, легко поддающимся анализу описанием. При этом точность аппроксимации должна быть достаточно высокой.

Ключевые слова: однофазный асинхронный двигатель, внешние фазосдвигающие устройства, полиномиальные модели, судовые системы автоматизации, метод планирования эксперимента.

To identify and study the basic laws of the magnetic processes of single-phase asynchronous motors (SPAM) in order to create a workable method for testing it, it is necessary to have a mathematical model in which the output indicators are directly related to the parameters. However, the use of well-known equations for currents and moments seems difficult due to complexity and cumbersome. It is more advisable to replace a