

ОПИСАНИЕ КЛАПАНА УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА КАК ДИНАМИЧЕСКОГО ЗВЕНА ДЛЯ СУДОВОГО МАЛООБОРОТНОГО ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Куколев А.А., Подгорный С.А., Пиотровский Д.Л.

Кубанский государственный технологический университет г. Краснодар

Ключевые слова: судовой главный двигатель, дизельный двигатель, управление, передаточная функция, турбокомпрессор, переходной процесс, наддув, устойчивость, подача топлива, электронное управление, теория управления, надежность.

Аннотация. В настоящее время большое распространение на крупнотоннажном танкерном и контейнерном флоте получили главные малооборотные двигатели с электронным управлением подачей топлива фирм MAN Diesel and Turbo, а также Wärtsilä-Sulzer. Передовые технические решения в области схмотехники, локально- вычислительных сетей, конструирования и управления позволили в короткие сроки разработать и запустить в эксплуатацию двигатели MAN серий ME-B и ME-C. Однако, в современном мире большинство свежих и малоизученных технологических решений подразумевает достаточно ограниченный объем теоретического материала описывающего принципы действия и технические особенности, что влечет за собой ограниченность научных работ и исследований в этой области. В частности, вопросы управления подобными двигателями в литературе освещены слабо в то время, как передовые решения в двигателестроении малооборотных агрегатов шагнули далеко вперед по направлению к работе на сжиженном природном газе и значительному снижению оксидов азота NO_x и окислов серы в атмосферу. Данная статья представляет к рассмотрению некоторые теоретические аспекты и особенности моделирования гидравлической аппаратуры подобного двигателя в отношении управления.

TWO-STROKE MARINE DIESEL ENGINE WITH ELECTRONIC CONTROL FIVE VALVE DYNAMIC UNIT MATHEMATIC DESCRIPTION

Kukolev A.A., Podgorny S.A., Piotrovsky D.L.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: marine main engine, diesel engine, control, transfer function, turbocharger, transient process, scavenge, sustainability, fuel control, electronic intelligent control, control theory, reliability.

Abstract. Nowadays 2 –stroke large bore marine diesel engines with electronic fuel and exhaust system control can be observed more and more often due to serious contribution of such making giants as MAN Diesel and Turbo and Wärtsilä-Sulzer. All the up-to-date and modern solutions in the case of circuitry, local area networks, control and design allowed the makers to design and distribute in a short period of time engines MAN series ME-B & ME-C. However, modern society and its structure defines the fact, that major part of modern inventions theoretical aspects and features is strictly limited and this leads to lack of observations in this sphere. Namely, the control aspects of such engines is not described, whilst modern large bore 2 stroke engines construction solutions have significantly moved further for the aim of harmful substances and poisonous gases such as NO_x release reduction. This article gives an overview over some theoretical features in modeling of oil system hydraulic units.

Проект по разработке и интеграции электронного управления подачей топлива на судовых малооборотных двигателях берет свое начало в 1991 году, когда немецкий концерн MAN B&W инициировал инновационную программу

Intelligent Engine Project. Всего за два года была разработана концепция и внедрена тестовая платформа Electronic Engine Control equipment на двигатель MAN 4T50MX. 1997й и 1998 год ознаменовался выпуском второго поколения системы управления подачей топлива и установкой дополнительных гидромеханических агрегатов и узлов в комплектации всей системы на т/х «Bow Cecil», а также на т/х «Shanghai Express». Первый собранный с подобной системой управления двигатель сошел со ступеней концерна MAN B&W в 2003 году [1]. Однако, эксплуатация первых моделей не проходила гладко. Показательна авария главного двигателя MAN B&W 12K98ME-C общей мощностью 61642 кВт т/х «Savannah Express» которая привела к столкновению судна с причальными сооружениями 19 июля 1995 года [2].

Тем не менее, ряд модификаций и усовершенствований в программном обеспечении и механической части позволил запустить и откорректировать серийное производство подобных двигателей, и к данному моменту времени они прочно заняли нишу на рынке судовых технических средств [3,12].

Общее устройство двигателей серии ME-C в отличие от классических двигателей MC с распределительным валом характерно наличием интеллектуальной системы управления подачей топлива, состоящей из универсальных электронно-вычислительных блоков, выполняющих функции управления агрегатами цилиндров (CCU); интерфейсных блоков (EICU); блоков управления двигателем (ECU); а также блоков управления вспомогательными механизмами (ACU) (рисунок 1) [1].

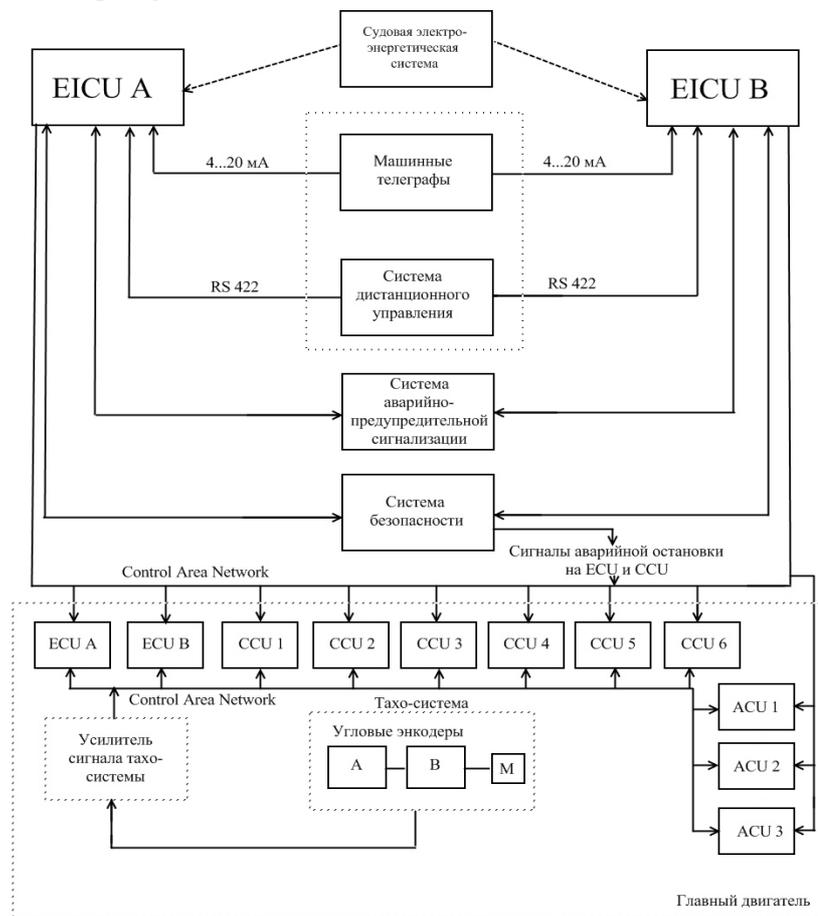


Рис. 1. Структурная схема системы управления судовым малооборотным двигателем MAN B&W 6S90 серий ME-B, ME-C

В свою очередь, гидравлическая система управления подачей топлива двигателя серии ME имеет ряд характерных особенностей и для отдельного цилиндра, смоделированная в программном обеспечении FluidSim Hydraulics, она имеет следующий вид (рисунок 2).

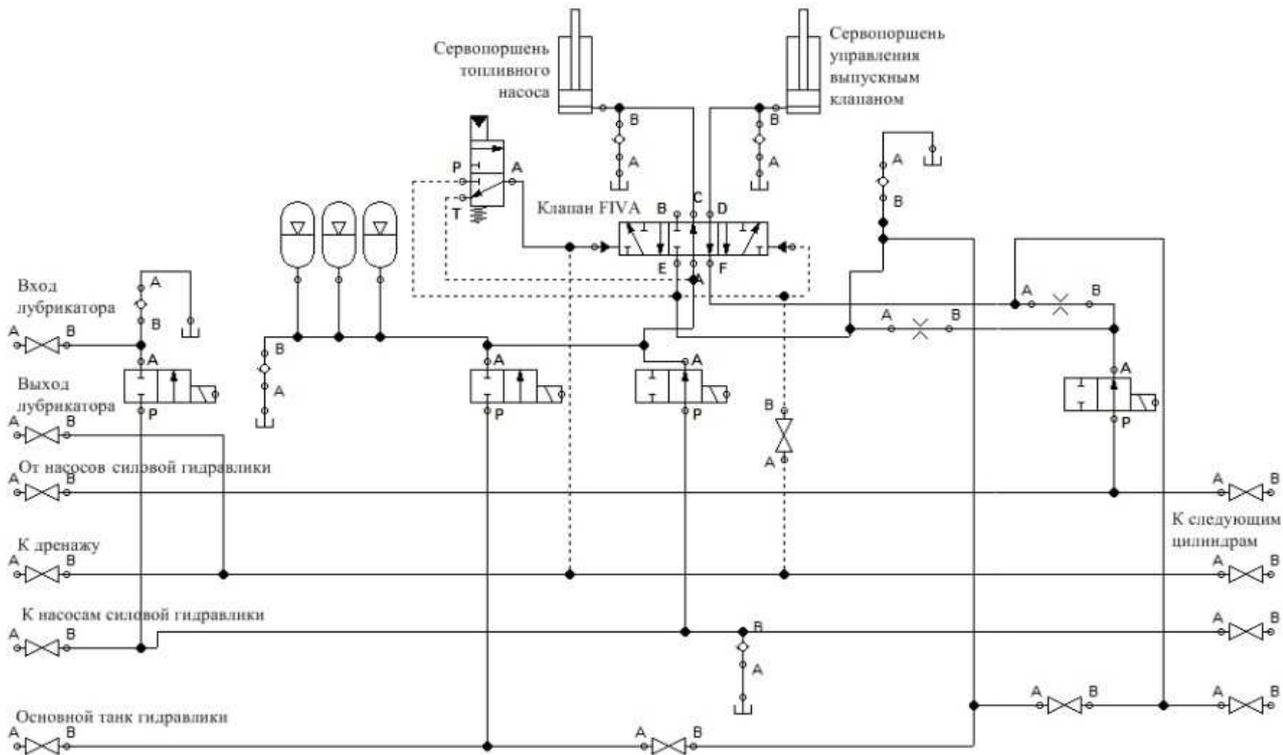


Рис. 2. Принципиальная схема гидравлической системы управления подачей топлива и работой выпускных клапанов

В связи с характерными особенностями структуры и конфигурации системы и ее составляющих, модель процесса подачи топлива на двигателе с электронным управлением можно представить в виде нескольких систем уравнений: уравнений работы клапана FIVA (Fuel Injection Variable Activation), уравнений работы ТНВД с форсункой, а также уравнений масляных и топливных трубопроводов, соединяющих всю систему воедино. Данная статья представляет к рассмотрению моделирование процесса работы клапана FIVA.

По состоянию на июль 2009 года в эксплуатации и проектировании клапанов- исполнительных механизмов изменяемой подачи топлива (клапаны FIVA) компании MAN Diesel and Turbo состояли клапана четырех фирм-изготовителей: Curtiss Wright, Nabtesco, Man Diesel и Bosch Rexroth [4]. Наибольшее распространение получили последние, в состав которых входит двухпозиционный электромагнитный управляющий клапан 1, корпус 2 с регулирующим органом 3, датчик положения органа 4 и блок управления 5 (рисунок 3) [5].

Характеристики всего исполнительного механизма можно достаточно достоверно определить, рассмотрев каждый из составляющих элементов в отдельности путем построения нескольких математических моделей и определив их передаточные функции.

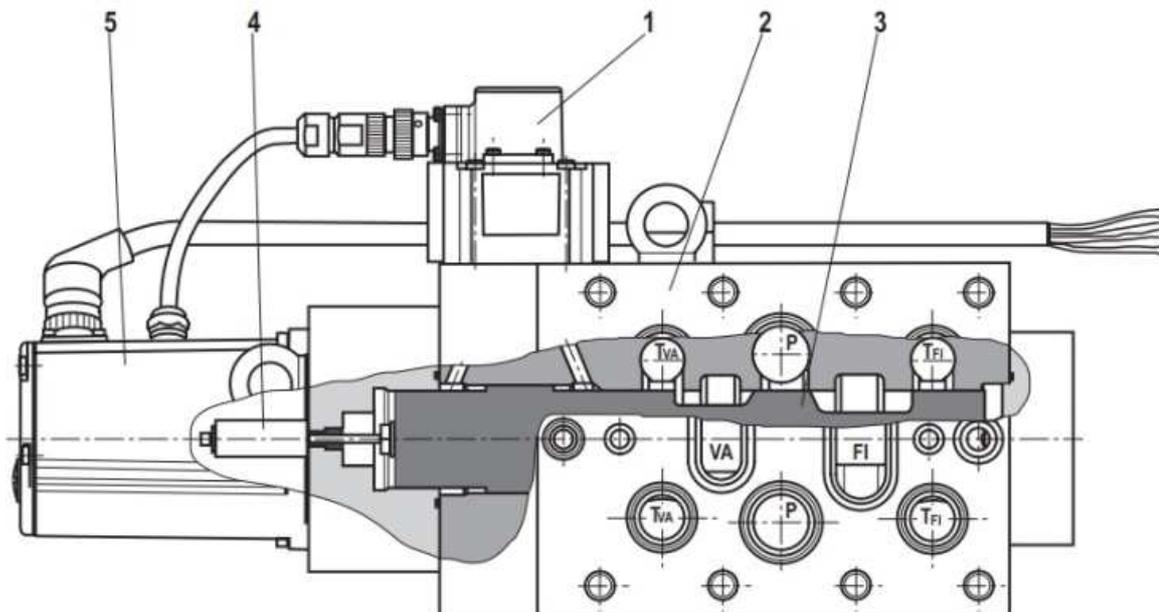


Рис. 3. Устройство клапана управления подачи топлива и работой выпускного клапана

В состав исполнительного механизма клапана FIVA входит пропорциональный предохранительный клапан. Его основными конструктивными элементами являются: электромагнит, подвижный якорь, корпус, дроссель и золотник [6]. Электрическую часть катушки клапана можно представить последовательностью комбинаций реактивностей и сопротивлений, то есть в виде RL- цепи [7]. Тогда ее дифференциальное уравнение примет вид:

$$V_{кат} = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt}.$$

Механическая часть управляющего клапана зачастую представляет собой подпружиненный якорь, движение которого можно описать уравнением [8]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_f = F_m = k_c i(t).$$

Электромагнитная и механическая части клапана используются для управления потоком через поверхности клапана посредством воздействия на положение якоря механизма. Баланс потоков нагнетающей линии может быть описан, как [9]:

$$p_{вых} = \frac{\beta}{V_{вых}} (Q_{нагн} - Q_{упр} - Q_{ос}).$$

При этом проток через полость управления можно определить, как [10]:

$$Q_{упр} = C_n A_{упр}(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} p_{упр}}.$$

Распределитель, перемещаясь под воздействием давления гидравлического масла, заставляет двигаться вверх сервопоршень и впрыскивающий плунжер ТНВД цилиндра, которые в свою очередь, нагнетают топливо по топливной магистрали к форсунке цилиндра. По окончании впрыска гидравлическая среда дренируется из подпоршневого пространства сервопоршня под воздействием силы тяжести (рисунок 4).

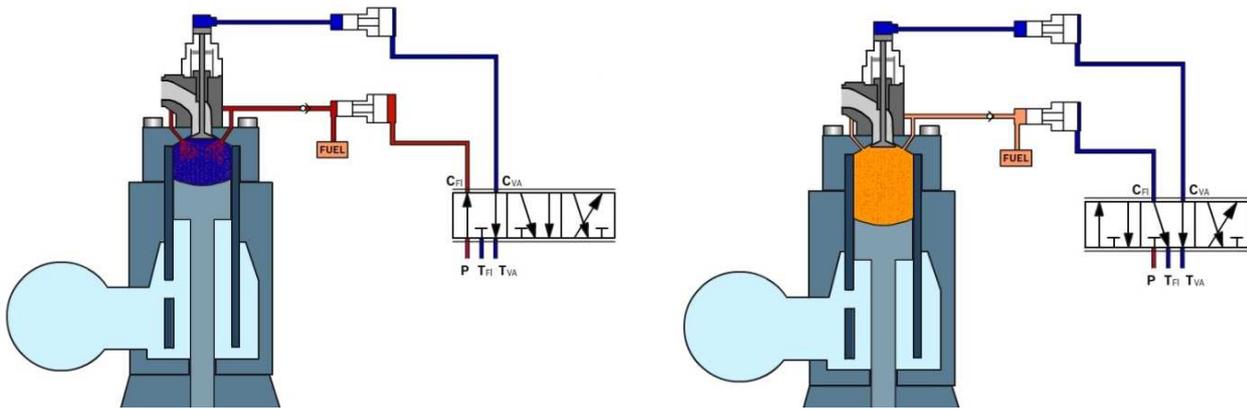


Рис. 4. Принцип действия распределителя силовой гидравлики клапана FIVA

Математически этот процесс можно описать следующим уравнением [11]:

$$m \frac{d^2 x_v(t)}{(dt)^2} + c \frac{dx_v(t)}{dt} + kx_v(t) = F_{Г}.$$

Работу регулирующего органа распределителя гидравлики можно описать уравнением баланса протоков нагнетающей линии:

$$\dot{p}_{вых} = \frac{\beta}{V_{вых}} (Q_{нагн} - Q_{упр}).$$

Соответственно, после преобразования всех уравнений по Лапласу, расчета передаточных функций и характеристических коэффициентов для двигателя MAN B&W 6S90 ME-C, можно получить составное динамическое звено (рисунок 5), которое при подаче 18 В входного постоянного напряжения управления катушку изменяет давление силовой гидравлики на выходе в соответствии с законом (рисунок 6).

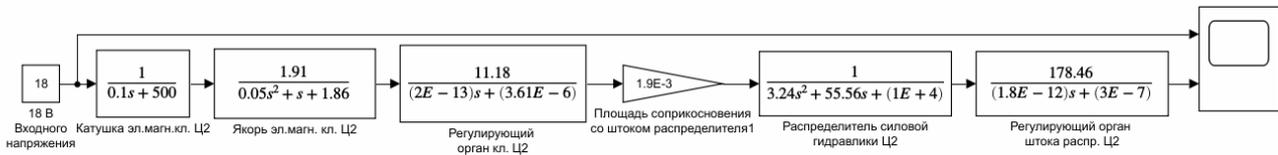


Рис. 5. Структурная схема клапана FIVA, как динамического звена

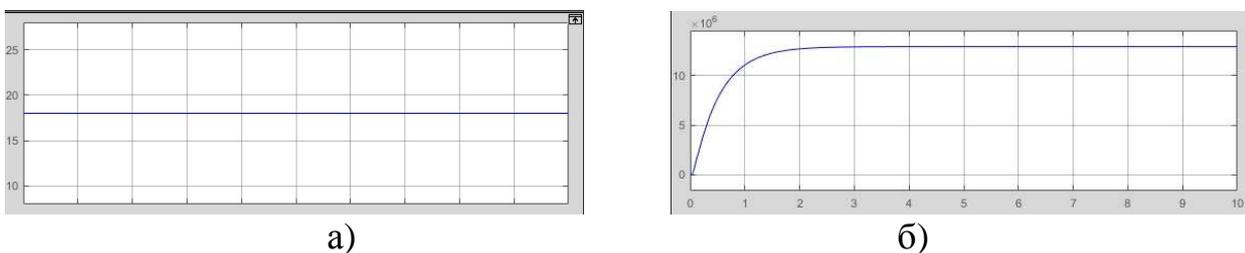


Рис. 6. Графики переходного процесса клапана FIVA- изменения давления на выходе распределителя гидравлики (б) при подаче 18 В на управляющий электромагнитный клапан (а)

Список литературы

1. Yang Yong Dong. Introduction to ME Engine: презентация инновационных разработок. – Изд.: MAN Prime Serve Academy, 2015. – 20 с.

2. The United Kingdom Merchant Shipping Association, Report on the investigation of the engine failure of Savannah Express and her subsequent contact with a linkspan at Southampton docks: доклад о расследовании происшествия. – United Kingdom Merchant shipping, 2006. – 58с.
3. MAN Diesel & Turbo. Service experience over 2014: научный журнал. – MAN B&W Two Stroke Engines, 2014. – 36 с.
4. Yang Yong Dong. Hydraulic cylinder unit: презентация инновационных разработок. – MAN Prime Serve Academy, 2015. – 61 с.
5. Rexroth Bosch Group, Directional Control Valve with integrated electronics for large diesel engines type STW 0175 and STW 0280: инструкция по эксплуатации. – Bosch Rexroth AG, 2016. – 12 с.
6. Денисов В.А., Третьякова М.Н., Бородин О.А., Макаров С.В., Исследование динамических характеристик пропорционального электромагнита // Electrical Facilities and Systems. 2017. №3, Т.12.
7. Bishop R.H. Mechatronic systems, sensors, and actuators: fundamentals and modeling, учебник. – Изд.: CRC Press, 2007. – 692 с.
8. Badr M.F. Modelling and simulation of a controlled solenoid // 2nd International Conference of Engineering Sciences. – IOP Publishing, 2018.
9. Xiangyang Xu, Xiao Han, Yanfang Liu, Yanjing Liu, Yang Liu. Modeling and Dynamic Analysis on the Direct Operating Solenoid Valve for Improving the Performance of the Shifting Control System // Applied Sciences. – MDPI, 2017. – 19p.
10. Maolin Kai, Yixuan Wang, Yan Shi, Hanwen Liang. Output dynamic control of a late model sustainable energy automobile system with nonlinearity // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol.8 (11).
11. Vijai Mishra, Dr. Sunil Chandel. Modelling and parametrization of direction control valves // International journal of Engineering technology, Science and Research”. 2018. Vol. 5(3).
12. Куколев А.А., Пиотровский Д.Л. Основные направления развития систем диагностирования ДВС на морском транспорте // Вестник Адыгейского государственного университета. 2019. Вып. 1 (236).

Сведения об авторах:

Куколев Александр Александрович – аспирант, КубГТУ, Краснодар;

Подгорный Сергей Александрович – д.т.н., профессор, КубГТУ, Краснодар;

Пиотровский Дмитрий Леонидович – д.т.н., профессор, МГУТУ имени К.Г. Разумовского, Темрюк.