

Научная статья
УДК 621.432

Создание электрогидравлического привода клапанов механизма газораспределения в условиях автономной локомотивной теплоэнергетической установки

Даниил Сергеевич Шувалов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия
dnlshuvalov@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8954-995X>

Аннотация. Актуальной задачей при создании новых образцов и совершенствовании уже разработанных локомотивных теплоэнергетических установок является разработка мероприятий, направленных на повышение топливной экономичности на эксплуатационных режимах. Одним из технических решений является обеспечение наиболее эффективной смены рабочего тела в цилиндрах путем гибкого управления параметрами воздухообмена, что достигается применением альтернативных регулируемых приводов клапанного механизма газораспределения (МГР).

В статье выполнен теоретический анализ управляемых и неуправляемых фаз газораспределения (ФГР), который показал, что наиболее перспективным способом достижения наилучшей топливной экономичности на частичных режимах работы силовой установки является использование управляемых фаз газораспределения. Проведены расчетно-теоретические исследования по определению оптимальных фаз клапанов на режимах, отличных от номинального для двигателя типа ЧН26/26. Выполнен анализ альтернативных приводов органов газообмена для транспортных средств и энергетических установок. Обоснован выбор замены базового привода клапанов на электрогидравлический в условиях локомотивной установки. Создана электрогидравлическая система управления фазами выпускных клапанов, для которой разработана принципиальная схема работы и произведена ее эскизная проработка.

Ключевые слова: газораспределение, привод клапанов, электрогидравлический привод, управляемые фазы, топливная экономичность.

Для цитирования: Шувалов Д. С. Создание электрогидравлического привода клапанов механизма газораспределения в условиях автономной локомотивной теплоэнергетической установки // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. №1(39).

Creation of the electro-hydraulic valve drive of the valve train in conditions of autonomous locomotive thermal power plant

Daniil S. Shuvalov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
dnlshuvalov@ya.ru

Abstract. A crucial task in the development of new models and improvement of the already developed locomotive thermal power plant is the development of measures aimed at improving fuel efficiency at operating modes. One of the technical solutions is to ensure the most efficient change of working mass in cylinders by flexible control of air supply parameters, which is achieved by the use of alternative adjustable valve drives of the valve train (GRM).

In the article the theoretical analysis of controlled and uncontrolled valve timing is conducted (FGR), which showed that the most promising way to achieve the best fuel efficiency at partial operation modes of the power plant is the use of controlled valve timing. Calculation-theoretical researches on definition of optimum phases of valves on modes, different from nominal for engine type ChN26/26 are carried out. Alternative drives of gas exchange organs for vehicles and power plants are analysed. The choice of replacing the basic valve drive with an electro-hydraulic drive in locomotive plant conditions is justified. An electro-hydraulic system for controlling the exhaust valve phases is created, for which a principle scheme of operation is developed and its sketching is carried out.

Keywords: valve train, valve drive, electric-hydraulic drive, controlled valve timing, fuel efficiency.

For citation: Shuvalov D. S. Creation of the electro-hydraulic valve drive of the valve train in conditions of autonomous locomotive thermal power plant. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. №1(39).

Введение

Конкуренция производителей на мировом рынке, постоянно ужесточающиеся требования стандартов, запросы потребителей принуждают разработчиков непрерывно совершенствовать технологии в двигателестроении, в том числе и в системе механизма газораспределения.

Альтернативному приводу клапанов газораспределения в основном уделяют внимание автомобильные производители и в этой области ведущими фирмами достигнуты достаточно высокие показатели. Но в тоже

время, применительно к теплосиловым установкам среднескоростного транспорта, а именно автономного подвижного состава, на данный момент не разработаны малогабаритные, долговечные, экономичные и технологичные газораспределительные механизмы с изменяемыми фазами газораспределения, применимые для массового использования. На основании многолетних исследований можно сказать, что сложно создать систему для управления фазами клапанов для локомотивной энергоустановки, вследствие сложной компоновки деталей МГР в крышке цилиндра [1]. Для решения этой задачи наиболее перспективными являются системы управляемых фаз газораспределения на основе газораспределения с электрогидравлическим управлением.

Теоретический анализ фаз газораспределения

МГР может иметь неуправляемые фазы газораспределения или управляемые [7]. В двигателях с неуправляемыми фазами газораспределения оптимальное сгорание обеспечивается только на номинальном режиме. На неустановившихся режимах работы, то есть в процессе изменения во времени параметров дизеля, нарушаются процессы смесеобразования и сгорания в цилиндрах, вследствие невозможности осуществления оптимальных фаз газораспределения. Такой тип фаз имеет, например, тепловозный двигатель с воспламенением топливо - воздушной смеси от сжатия 16ЧН26/26 (Д49) номинальной мощностью 3000 кВт при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$. Механический клапанный привод данного двигателя представлен на рис. 1. В работе [8] приведены столбчатые диаграммы время работы локомотива от позиции контроллера машиниста, из которой можно заключить, что тепловозный двигатель большую часть времени работает на режимах, отличных от номинального. Для обеспечения доступного и плавного управления газораспределением применяют управляемые фазы газораспределения [4, 9, 12].

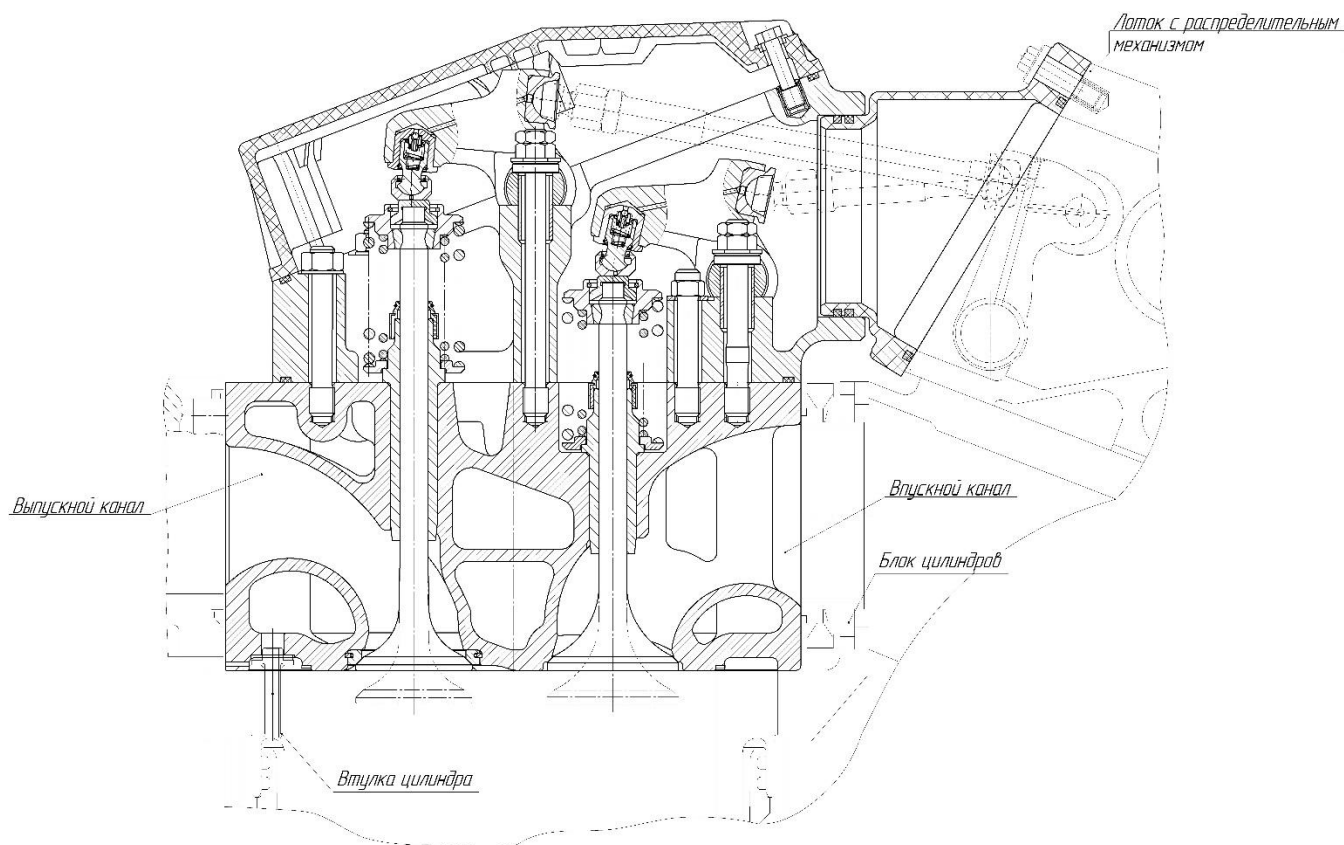


Рис. 1. Базовый привод клапанов тепловозного дизеля типа ЧН26/26

Исследование оптимальных фаз клапанов на частичных режимах силовой установки

Анализ теоретических, практических и опытных данных, изложенных в работе [8] позволяет заключить, что снижение удельного эффективного расхода топлива энергетической установки без увеличения выбросов оксидов азота является достаточно сложной задачей. Задача оптимизации фаз клапанов по нахождению оптимального пакета настроек взаимовлияющих параметров энергетической установки сводится к выбору комбинации, которая в совокупности обеспечивает решение поставленной цели.

Поиск лучшего набора основных показателей осуществлялся с помощью программного обеспечения «ДИЗЕЛЬ-РК», разработанного специалистами Технического университета имени Н. Э. Баумана [13]. Конечным итогом оптимизации фаз клапанов является обеспечение наименьшего расхода топлива на каждом из частичных режимов и режиме

холостого хода при максимально возможном давлении сгорания в цилиндре и сохранении коэффициента избытка воздуха без значительного изменения эмиссий окислов азота.

Результаты расчетов оптимизированных параметров для дизеля 16ЧН26/26 на разных частотах вращения коленчатого вала с неуправляемыми и с управляемыми ФГР представлены в таблице 1. График зависимости удельного эффективного расхода топлива от оборотов двигателя представлен на рис. 2.

Таблица 1

Результаты расчетов оптимизированных параметров для дизеля 16ЧН26/26 на разных частотах вращения коленчатого вала с неуправляемыми и с управляемыми ФГР

Мощность двигателя, P_e , кВт	Частота вращения коленчатого вала, n , мин ⁻¹	Удельный эффективный расход топлива, g_e , г/(кВт*ч)	Эмиссия окислов азота, NO_x , г/(кВт*ч)	Угол перекрытия клапанов, $\Phi_{\text{перекрытия}}$, град
Двигатель с неуправляемыми ФГР				
3001,2	1000	201,52	4,104	111
2236,3	750	199,61	5,798	
1420,3	500	204,46	7,530	
925,7	350	210,53	9,389	
Двигатель с управляемыми ФГР				
3001,2	1000	201,52	4,104	111
2250,4	750	198,37	5,719	103
1452,0	500	200,00	7,506	92
949,0	350	205,35	9,272	84

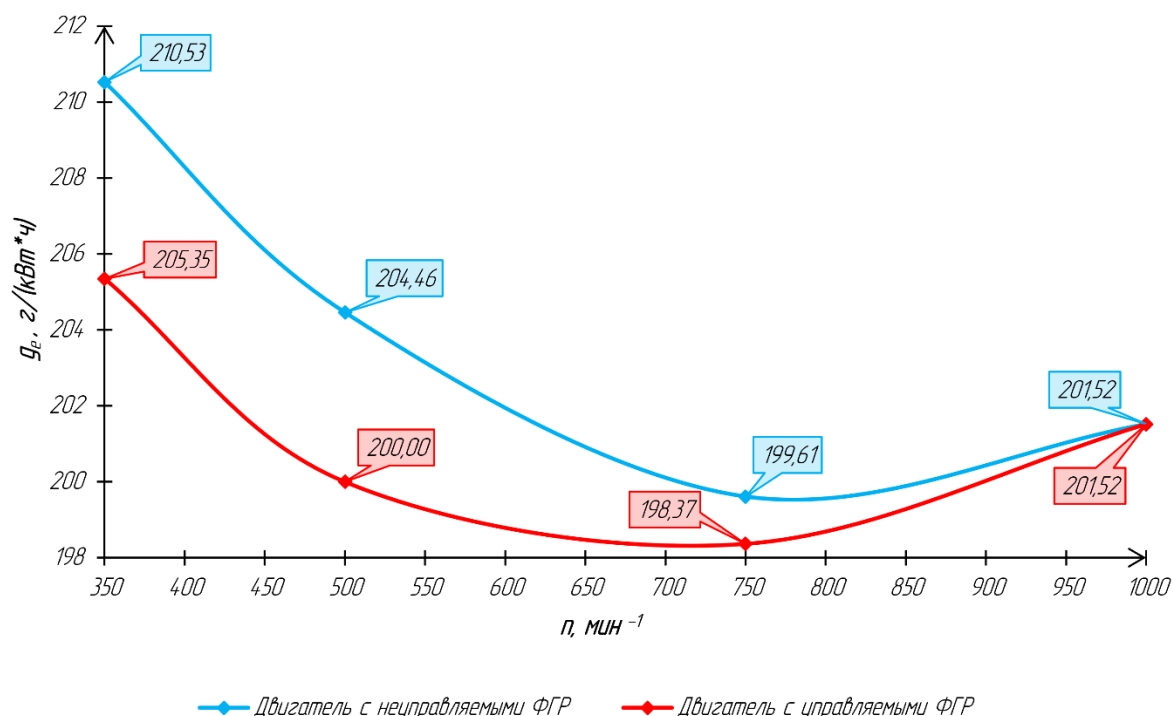


Рис. 2. График изменения удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения коленчатого вала n двигателя с неуправляемыми ФГР и двигателя с управляемыми ФГР

Анализ кривых удельного эффективного расхода топлива g_e (рис. 2) и данных таблицы 1 позволяет сделать вывод, что уменьшение перекрытия клапанов при снижении оборотов ДВС n приводит к улучшению расхода топлива до 2,46 %.

Необходимо отметить, что наибольший эффект по топливной экономичности на каждой из частот вращения коленчатого вала достигнут за счет изменения фаз только выпускных клапанов, поэтому принято решение разработать управляемый привод только для этих клапанов.

Виды альтернативного привода клапанов механизма газораспределения

На сегодняшний день известно большое многообразие видов альтернативного привода клапанов механизма газораспределения: гидравлический, электромагнитный, электрогидравлический и другие [3]. Указанные типы приводов в зависимости от воздействия эксплуатационного режима работы энергетической установки обладают разной конструкцией

органов газообмена и преимуществом модифицирования моментов открытия и посадки клапанов.

Самое широкое распространение на транспорте и в разнообразных отраслях промышленности нашел гидравлический привод, который обладает рядом достоинств: легкость управления и автоматизации; сравнительно высокая скорость срабатывания; возможность управлением продолжительностью «выстоя» клапана; достаточно высокий КПД (80 – 85 %); нет боковых сил, влияющих на шток клапана [1].

Недостатки гидравлического привода: силы сопротивления малы по отношению к силам инерции; потребность во вспомогательных приборах; вытекание рабочей жидкости через зазоры и уплотнения деталей гидрооборудования; пожароопасность при использовании горючей рабочей жидкости [1].

Так же большой интерес представляет электромагнитный привод. Главными задачами при его проектировании являются: обеспечение усилия, необходимого для открытия клапанов; сокращение времени срабатывания при минимальных конструктивных размерах; малая стоимость и минимальное потребление энергии.

Достоинства электромагнитного привода: работа привода от бортовой сети машины, одновременно с этим КПД возрастает, а механическая энергия двигателя не растрачивается на работу привода; присутствие в конструкции постоянных магнитов, а также симметрии способствуют снижению потребления энергии в целом и позволяют упростить систему управления приводом; работа без распределительного вала с управлением от электронной автоматики [5, 6].

Недостатки электромагнитного привода: большие габаритные размеры электромагнитного клапана; отсутствие кинематической связи между клапаном и коленчатым валом; необходимость охлаждения электромагнитов [2].

Электрогидравлический привод сочетает в себе преимущества гидравлического и электромагнитного способов управления для достижения необходимого быстродействия [1, 10, 11]. Важнейшими конструктивными достоинствами привода данного типа являются упрощенная компоновка крышки цилиндра, небольшая масса движущихся частей, повышение «времени-сечения» клапана при постоянных фазах газораспределения, снижение динамических нагрузок и уровня шума.

Принципиальная схема работы электрогидравлического привода

Для двигателя-прототипа на базе 16ЧН26/26 разработана принципиальная схема работы электрогидравлического привода (рис. 3). В проектируемом двигателе время срабатывания клапанов может меняться в зависимости от нагрузки двигателя в соответствии с оптимальными фазами газораспределения.

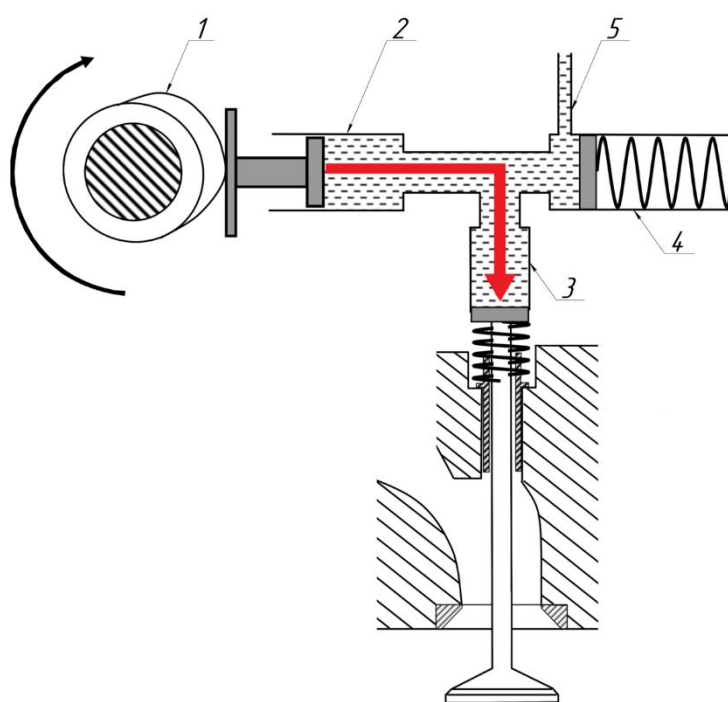


Рис. 3. Схема работы электрогидравлического привода: 1 – кулачок; 2 – насосный блок; 3 – камера высокого давления; 4 – электромагнитный клапан; 5 – аккумулятор давления.

Предлагаемая система управления выпускными клапанами обеспечивает различные режимы работы в зависимости от требований, предъявляемых к работе двигателя (рис. 4).

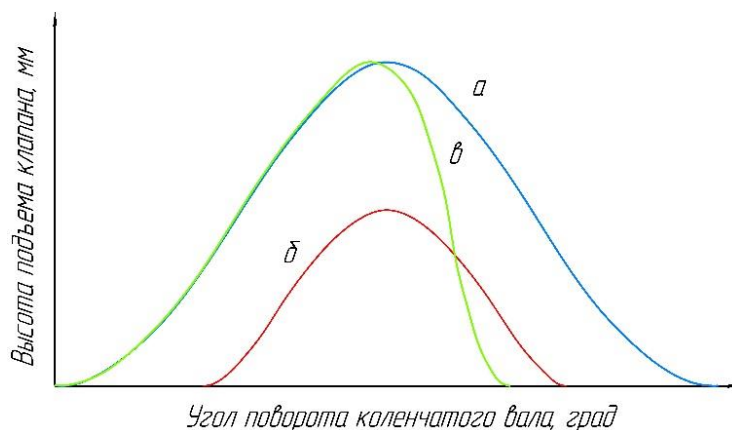


Рис 4. Режимы работы системы управления клапаном: а – полный подъем клапана, б – уменьшенный подъем клапана, в – раннее закрытие клапана

Принцип работы предлагаемого электрогидравлического привода. На режиме полного подъема клапана (рис. 4, а) вращающийся распределительный вал с кулачком 1 приводит в действие насосный блок 2, тем самым увеличивая давление в камере высокого давления 3. Толкатель камеры высокого давления под действием давления гидравлической жидкости опускается вниз и открывает клапан.

На режиме уменьшенного подъема клапана (рис. 4, б) система работает следующим образом. Если электромагнитный клапан 4 открыт во время приведения в действие гидравлического насоса, клапан не открывается. Повышенное давление гидравлического масла не приводит к перемещению клапана, вместо этого перемещается поршень аккумулятора давления 5. Таким образом, клапан может быть открыт с запаздыванием. Подъем клапана уменьшается, поскольку кулачок больше не может обеспечить необходимое количество масла для обеспечения полной высоты подъема клапана. Во время опускания профиля кулачка пружины клапана возвращают накопленную энергию на распределительный вал.

На режиме раннего закрытия клапана (рис. 4, в), когда электромагнитный клапан открыт, давление гидравлического масла

изменяется в соответствии с характеристикой пружины аккумулятора давления. Если электромагнитный клапан открывается в течение периода открытого клапана, клапан закрывается в результате внезапного падения давления масла. Аккумулятор давления заряжен. Во время опускания профиля кулачка аккумулятор давления возвращает накопленную энергию на распределительный вал, и масляная камера высокого давления заполняется нужным количеством масла.

Результаты твердотельного моделирования электрогидравлического привода

Эскизные проработки были произведены с использованием современного инструмента твердотельного моделирования – Solid Edge. Результат данной работы представлен на рис. 5, 6.

В отличие от классического механического привода клапанов (рис. 1), где усилие от профиля кулачка передается на клапан двигателя с помощью жестких элементов (рычагов, штанги), в предлагаемой электрогидравлической системе используется промежуточная гидравлическая связь.

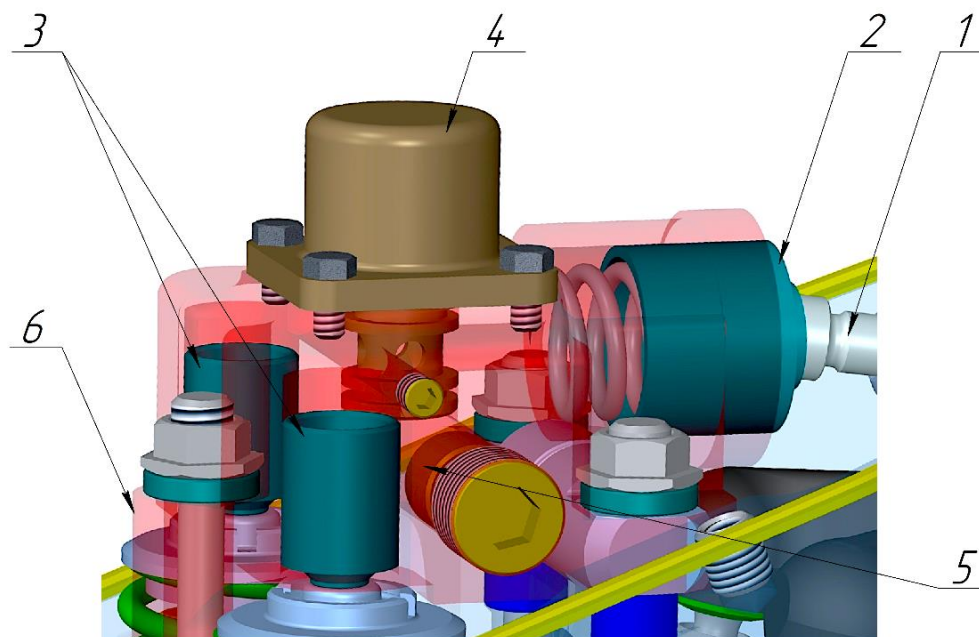


Рис. 5. Твердотельная модель привода управления выпускными клапанами механизма газораспределения: 1 – штанга, 2 – насосный блок, 3 – камеры высокого давления, 4 – электромагнитный клапан, 5 – аккумулятор давления, 6 – корпус

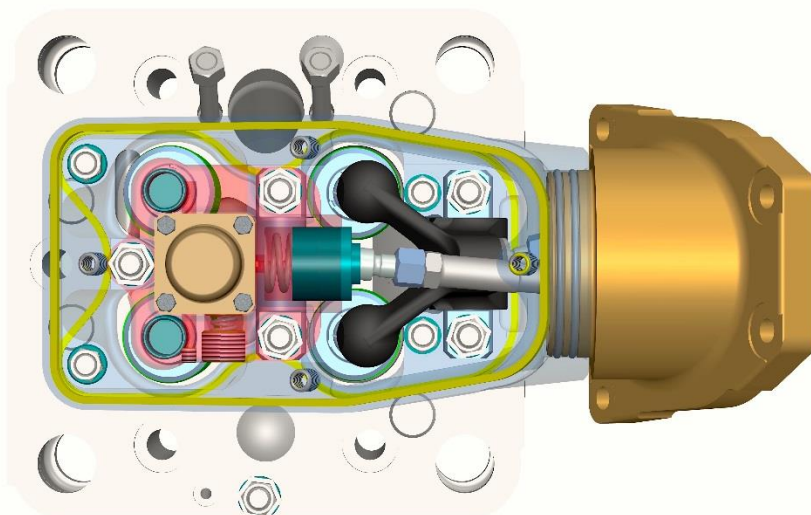


Рис. 6. Модель крышки цилиндра (вид сверху) с электрогидравлическим приводом

Предлагаемая электрогидравлическая система управления фазами выпускных клапанов включает кулак, ролик с рычагом, штангу 1, насосный блок 2, камеры высокого давления 3, электромагнитный клапан 4, аккумулятор давления 4, а также систему каналов. Все компоненты расположены в корпусе 6.

Насосный блок служит для повышения давления масла за счет сжатия рабочей жидкости. Он состоит из плунжера, который входит во втулку. Камеры высокого давления представляют собой цилиндры, в которые поступает рабочее гидравлическое масло. Толкатели под действием давления масла опускаются и давят на клапаны, которые, в свою очередь, открываются. Электромагнитный клапан изменяет объем гидравлической жидкости в камерах высокого давления. Он состоит из корпуса, электромагнита и штока с конической частью. Аккумулятор давления состоит из поршня и пружины. Он поддерживает определенное давление рабочей гидравлической жидкости. Пружины в данной системе служат для предотвращения разрыва кинематики во избежание ударных нагрузок. Две цилиндрические пружины, внутренняя и внешняя, осуществляют закрытие клапанов при падении давления в камерах высокого давления.

Продолжительность открытия выпускного клапана для проектируемого электрогидравлического привода клапанов составляет:

$$\Phi_{\text{вып}} = \varphi_{\text{о.вып}} + 180^\circ + \varphi_{\text{з.вып}} = 295^\circ \text{ п. к. в.}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{о.вып}}$ – угол опережения открытия выпускного клапана, $\varphi_{\text{з.вып}}$ – угол запаздывания закрытия выпускного клапана.

Так как в гидравлической системе могут присутствовать потери гидравлической жидкости, то в проектируемом приводе клапанов следует установить кулаки 1-20ДГ.92.15-06 с углом действия клапана равным 300° .

Выводы

1. Совершенствование газораспределительного механизма является одним из технических решений улучшения работы поршневого двигателя по экономическому показателю – расходу топлива.
2. При применении управляемых ФГР на частичных режимах работы силового агрегата достигнуто снижение удельного расхода топлива на 2,5 %.
3. Анализ проведенных исследований для дизеля 16ЧН26/26 показал целесообразность использования управляемых ФГР для оптимального протекания процессов воздухообмена в цилиндре.
4. Для теплоэнергетической установки 16ЧН26/26 разработана принципиальная схема работы электрогидравлического привода и произведена его эскизная проработка.
5. Предлагаемая электрогидравлическая система разработана с упором на достижение функциональных требований при минимально возможных изменениях конструкции серийного дизеля, а также его габаритов.

Список источников

1. Балабин, В. Н. О приводе клапанов газораспределения тепловозных дизелей / В. Н. Балабин // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 2. – С. 47-49. – EDN NYUGON.

2. Балабин, В. Н. Проблемы внедрения электромагнитного привода клапанов газораспределения на современных локомотивных ДВС / В. Н. Балабин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 2-1. – С. 14-19. – EDN TFOBHN.
3. Балабин, В. Н. Экспериментальные исследования электрогидравлического привода клапанов газораспределения транспортных двигателей / В. Н. Балабин // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 94-97. – EDN JYBFCN..
4. Лашко, В. А. Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС / В. А. Лашко // Ученые заметки ТОГУ. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 260-287. – EDN SAMRBL.
5. Быстродействующие электромагнитные привода для клапанов систем топливоподачи и воздухогазообмена двигателей внутреннего сгорания / А. В. Павленко, В. П. Гринченков, Д. В. Батищев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 48-53. – EDN OJHYJV.
6. Соснин, Д. А. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных легковых автомобилей. Учебное пособие / Д. А. Соснин. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 272 с. – ISBN 5-93455-087-X. – EDN RAZLIN.
7. Чайнов, Н. Д. Конструирование и расчет поршневых двигателей: учебник для вузов. / Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков; под ред. Н. Д. Чайнова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 536 с.
8. Чайнов, Н. Д. Прочность теплонапряженных базовых деталей среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания / Н. Д. Чайнов, М. И. Раенко, В. А. Рыжов. – Москва : Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2015. – 360 с. – ISBN 978-5-94275-794-6. – EDN VSTPEH.
9. Elektrohydraulische Ventilsteuerung mit dem „MultiAir“ / L. Bernard, A. Ferrari, D. Micelli, A. Perotto, R. Rinolfi, F. Vattaneo // MTZ - Motortechnische Zeitschrift. – 2009. – Vol. 70. – no.12. – P. 892–899. . – DOI 10.1007/bf03225530.
10. Christen, C. Engine Control and Performance Enhancement with Variable Valve Train for Gas Engines / C. Christen, E. Codan // Aufladetechnische Konferenz, Dresden, Germany, 2011.
11. Mathey, Ch. Variable Valve Timing – A necessity for future large diesel and gas engines / Ch. Mathey // 26th CIMAC World Congress, Bergen, Norway, 2010. – paper no. 298.
12. Haas, Michael. Elektrohydraulischer vollvariabler Ventiltrieb / Michael Haas; Martin Rauch / MTZ - Motortechnische Zeitschrift. – 2010. – Vol. 71. – P. 160-165.
13. Diesel-RK. Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК : официальный сайт [Электронный ресурс]. – Москва. Режим доступа: <https://diesel-rk.ru/Rus/index.php?page=Main> (дата обращения: 14.06.2023).

References

1. Balabin V.N. *ZHeleznodorozhnyj transport*, 2007, no. 2, pp. 47-48.
2. Balabin V.N. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2015, no. 2, pp. 14-19.
3. Balabin V.N. *Nauka i tekhnika transporta*, 2008, no. 4, pp. 35-37.
4. Lashko V. A. *Uchetnye zametki TOGU*, 2014, no. 1, pp. 260-287.
5. Pavlenko A.V., Grinchenkov V.P., Batishchev D.V., GummeI' A.A., Bol'shenko I.A. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*, 2010, no. 5, pp. 48-53.
6. Sosnin D.A. *Avtotronika. Elektrooborudovanie i sistemy bortovoj avtomatiki sovremennyh legkovykh avtomobilej: Uchebnoe posobie* (Electrical equipment and on-board automation systems of modern passenger cars: A textbook), Moscow, SOLON-R, 2001, 272 p.
7. Chaynov N.D., Krasnokutskiy A.N., Myagkov L.L. *Konstruirovanie i raschet porshnevnykh dvigateley* (Design and Calculation of Piston Engines). Moscow, BMSTU Press, 2018, 536 p. (in Russian).
8. Chaynov N.D., Raenko M.I., Ryzhov V.A. *Prochnost' teplonapryazhennykh bazovykh detaley sredneoborotnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Strength of Heat-Stressed Base Parts of Medium-Speed Internal Combustion Engines). Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015, 360 p. (in Russian).
9. Bernard L., Ferrari A., Micelli D., Perotto A., Rinolfi R., Vattaneo F. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 2009, vol. 70, no.12, pp. 892–899, DOI 10.1007/bf03225530.
10. Christen C., Codan, E. *Aufladetechnische Konferenz*, Dresden, Germany, 2011.
11. Mathey Ch. *26th CIMAC World Congress*, Bergen, Norway, 2010, paper no. 298.
12. Haas Michael, Rauch Martin. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 2010, Vol. 71, pp. 160-165.
13. URL: <https://diesel-rk.ru/Rus/index.php?page=Main>. (14.06.2023) (in Russian).

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторе

Шувалов Даниил Сергеевич, магистрант, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Information about the author

Shuvalov Daniil S., undergraduate, BMSTU.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 18.03.2024; принята к публикации 19.03.2024.

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 18.03.2024; accepted for publication 19.03.2024.