

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА КЛАПАНОВ ДВС

**Максимов Алексей Валерьевич**<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры «Автомобильные двигатели и сервис»

**Зими́на Лариса Александровна**<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры «Автомобильные двигатели и сервис»

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

**Курдюмов Владимир Иванович**<sup>2</sup>, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

<sup>1</sup>420111, РФ, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,

Тел. 8(843) 231-02-02, 89276713976

E-mail: larek.adis@mail.ru

432017, РФ, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

Тел. 8(8422) 55-95-95

E-mail: amibzhd@yandex.ru

**Ключевые слова:** автотракторная техника, двигатель, клапаны, гидравлический привод, расчетная модель, фактор «время-сечение»

Эффективность работы сельскохозяйственной автотракторной техники во многом зависит от качества работы двигателя. Характеристики двигателя внутреннего сгорания зависят от качества газообмена его цилиндров с окружающей средой. Механический привод клапанов газораспределительного механизма не позволяет оптимизировать газообмен для всех режимов работы двигателя. Для совершенствования показателей двигателя внутреннего сгорания предложен независимый от положения коленчатого вала аккумуляторный гидравлический привод клапанов с электронным управлением. Такой привод обеспечивает гибкость управления временем открытого состояния клапана и моментом его открытия, обладая при этом достаточной компактностью и быстродействием. Предложена схема такого привода с двухсторонним силовым гидроцилиндром, который управляется золотниковым распределителем с пьезомеханическим приводом. Выбор привода распределителя обусловлен его высоким быстродействием. Питание на этот исполнительный механизм подает электронный блок управления двигателем. Рабочим телом привода является моторное масло двигателя. Для исследования влияния различных факторов на работу гидравлического привода составлена расчетная модель в среде Simulink. Она учитывает путевые и местные потери давления масла, инерционные явления столба жидкости, трение в элементах привода клапана двигателя, утечки жидкости через зазоры. На базе модели проведены численные исследования гидравлического привода. Выявлено влияние на его работу утечек масла и волновых явлений в магистралях привода, температуры масла, частоты вращения коленчатого вала и перепада давления на тарелку клапана двигателя. Доказано, что привод сохраняет работоспособность до  $-20^{\circ}\text{C}$  при использовании масла SAE 10W-30, имеет достаточное быстродействие и обеспечивает большую пропускную способность клапанов по сравнению с клапанами, имеющими традиционный привод вплоть до 5700 об/мин.

### Введение

Сельскохозяйственная автотракторная техника в основном использует четырехтактные сравнительно низкооборотные дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Транспортные работы проводятся в широком диапазоне нагрузочно-скоростных режимов работы двигателя, а работы, связанные с возделыванием сельскохозяйственных культур, проводятся с малым изменением нагрузки двигателя при почти неизменном скоростном режиме работы ДВС. Необходимый режим работы двигателя определяется в том числе последовательностью открытия и продолжительностью открытого состояния

клапанов двигателя. Для этого традиционно используется механический привод клапанов газораспределительного механизма. Такой привод не позволяет управлять моментами открытия и закрытия клапанов. Это препятствует эффективному газообмену на отдельных режимах работы ДВС. Для снятия ограничения по управлению моментами срабатывания клапанов и длительности их открытого состояния применяют различные механизмы привода клапанов, не имеющие жесткой связи между распределительным и коленчатым валами [1, 2, 3]. Это механические [4], гидравлические [5] или электрические [6] фазовращатели, механизмы привода клапана от кулачков различной формы [7], меха-

низмы бесступенчатого управления клапанами [5]. Активно разрабатываются альтернативные гидравлические [8, 9, 10], пневматические [11] и электрические (электромагнитные и электро-механические) [12, 13] приводы клапанов, у которых работа клапанов двигателя не зависит от положения коленчатого вала.

Для низкооборотных дизельных двигателей тракторов сельскохозяйственного назначения задача разработки альтернативного привода клапанов наиболее актуальна. Такой привод позволит облегчить запуск двигателя, уменьшить эффективный расход топлива за счет регулирования состава смеси в цилиндрах, изменения интенсивности движения заряда [14], отключения отдельных цилиндров [15, 16] в определенных условиях эксплуатации. Могут быть снижены затраты мощности на привод клапанов и уменьшены токсичность отработавших газов и создаваемый шум. Исчезает необходимость в регулировании теплового зазора.

#### Материалы и методы исследований

Для повышения эффективности работы двигателя автотракторной техники предлагается использовать независимый аккумуляторный гидропривод клапанов (рис. 1).

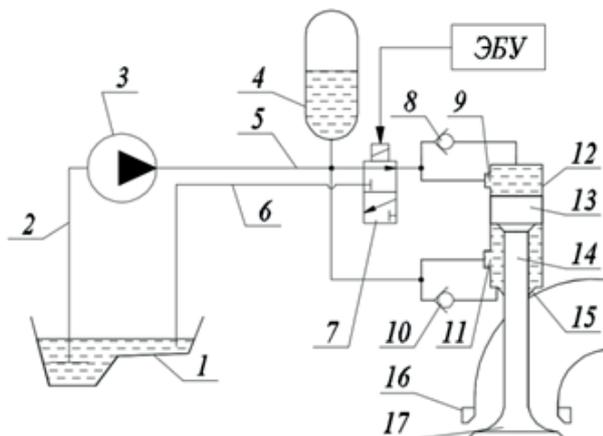


Рис. 1 – Схема привода клапана (обозначения в тексте):

Привод состоит из поддона двигателя 1, всасывающей 2, нагнетающей 5 и сливной 6 магистралей, насоса 3, гидроаккумулятора 4, золотника 7, клапанов отключения верхнего и нижнего гидротормозов 8 и 10, окон верхнего и нижнего гидротормозов 9 и 11, гидроцилиндра 12 с поршнем 13, расположенным на стержне 14 клапана 17 ДВС. Ограничивают перемещение поршня гидроцилиндра нижний 15 и верхний 16 упоры.

Привод работает следующим образом. Насос забирает масло из поддона двигателя и подает в нагнетательную магистраль, с которой постоянно связана нижняя полость гидроцилиндра привода. Верхняя полость гидроцилиндра с помощью золотника попеременно соединяется с магистралью нагнетания или слива. Золотником управляет электронный блок управления (ЭБУ). Если обе полости гидроцилиндра соединены с нагнетательной магистралью, то вследствие различия площадей верхней и нижней сторон поршня возникает сила, стремящаяся открыть клапан ДВС. Если верхняя полость гидроцилиндра соединяется со сливной магистралью, то под действием перепада давления на поршне клапан ДВС стремится закрыться. Перемещение поршня гидроцилиндра ограничено верхним и нижним упорами. Плавную посадку клапана и его торможение при максимальном подъеме обеспечивают окна гидротормоза. Их перекрытие поршнем гидроцилиндра ограничивает слив масла, что создает перепад давления, тормозящий поршень. Для быстрого перемещения поршня гидроцилиндра от крайнего положения в противоположную сторону подача масла в какую-либо полость организуется одновременно через окно гидротормоза и через клапан отключения тормоза. Для снижения влияния гидравлических сопротивлений и борьбы с колебаниями давления применен гидроаккумулятор. Он стабилизирует скорость течения масла во всасывающей и нагнетающей магистральных. Рабочей жидкостью привода является моторное масло со спецификацией SAE 10W-30.

Для исследования влияния различных факторов на работу гидравлического привода составлена расчетная модель в среде Simulink (рис. 2). Характеристики элементов выбирали с учетом материалов ранее выполненных исследований, в том числе исследований рабочих процессов в топливных системах дизельных двигателей [17].

Основные параметры привода следующие: диаметр гидроцилиндра – 15 мм, высота подъема клапана  $h = 12$  мм, давление питания – 20 МПа.

Применен пьезомеханический рычажный привод управляющего золотника. Питание столбика пьезоэлементов в виде прямоугольных импульсов со скважностью 20 % и периодом 20 мс осуществляется с помощью транзисторных ключей. Перемещение золотника составляет 6 мм. Расчетный блок привода золотника представлен

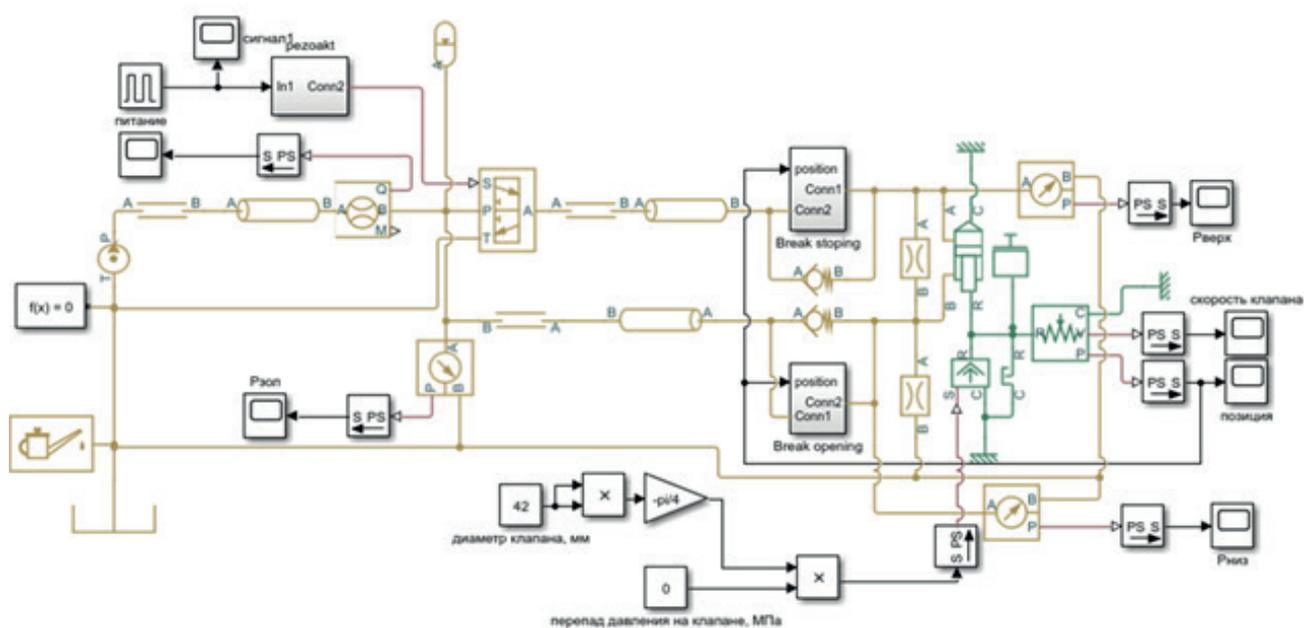


Рис. 2 – Расчетная модель гидравлического привода клапанов ДВС

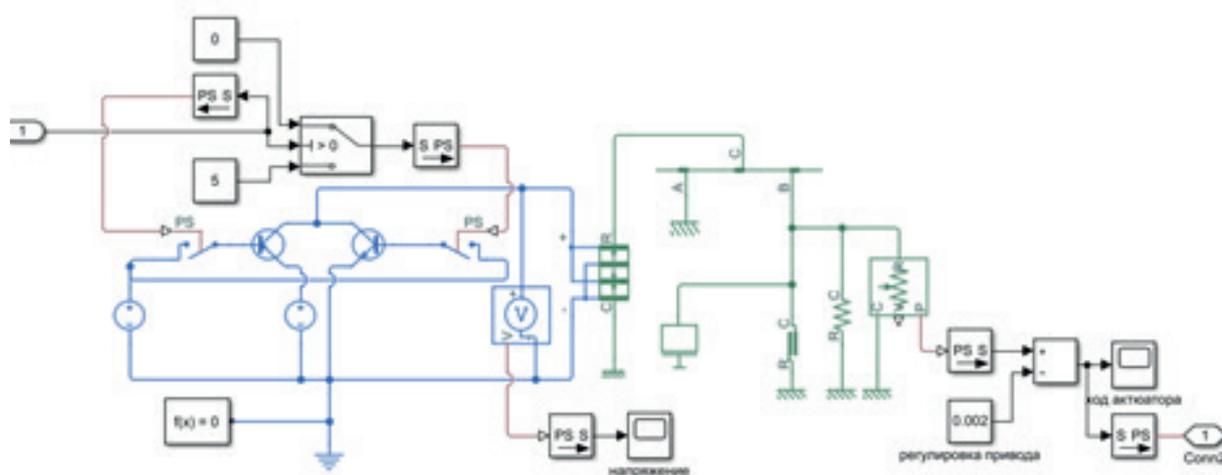


Рис. 3 – Расчетный блок привода золотника

на рис. 3.

Расчет модели проводили с помощью метода трапеций с интерполяцией Рунге-Кутты ode23t. Критерием окончания расчета являлось возникновение повторяемости в срабатывании привода клапана ДВС.

#### Результаты исследований

Исследовали влияние основных определяющих факторов на работу гидравлического привода клапанов.

1. Исследовали влияние закона перемещения золотника на работу гидравлического привода.

2. Оценивали влияние утечек масла на работу гидропривода. Моделировали утечки по поршневому зазору между верхней и нижней

полостями гидроцилиндра, утечки из нижней полости гидроцилиндра по его штоку, а также перетекание масла по зазору золотника. Для оценки влияния указанных выше утечек использовали выраженное в процентах отношение площади зазоров к площади подвижного элемента. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

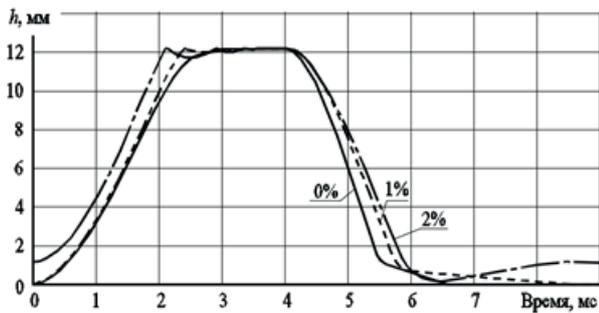


Рис. 4 – Влияние зазоров на перемещение поршня гидроцилиндра

3. Оценивали влияние путевых потерь давления в магистралях внутренним диаметром 6 мм при температуре масла 100 °С.

4. Исследовали влияние волновых процессов на работу гидропривода. Оно проявляется в значительном изменении давления (от 0 МПа до 63 МПа) в полостях гидроцилиндра (рис. 5). Для борьбы с колебаниями давления в приводе предложено использовать демпфер пульсаций в виде гидроаккумулятора.

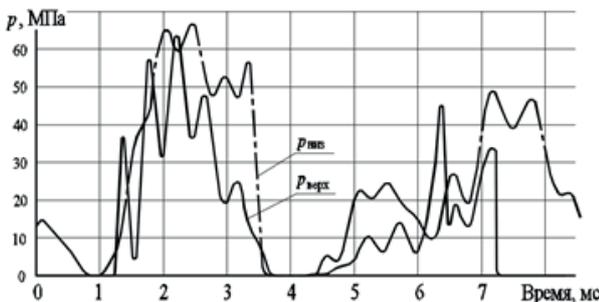


Рис. 5 – Изменение давления в полостях гидроцилиндра в зависимости от времени

5. Температура масла влияет на гидравлические потери в магистралях и, следовательно, на работу гидропривода, поэтому исследовали работоспособность привода при температуре масла в диапазоне -30...100 °С.

6. Исследовали влияние частоты вращения коленчатого вала на быстродействие гидравлического привода, определяемое в углах поворота коленчатого вала. Сигнал на открытие клапана двигателя подавался при нулевом угле поворота коленчатого вала, а сигнал на закрытие клапана - при 130°, независимо от частоты вращения вала. Результаты исследования представлены на рис. 6.

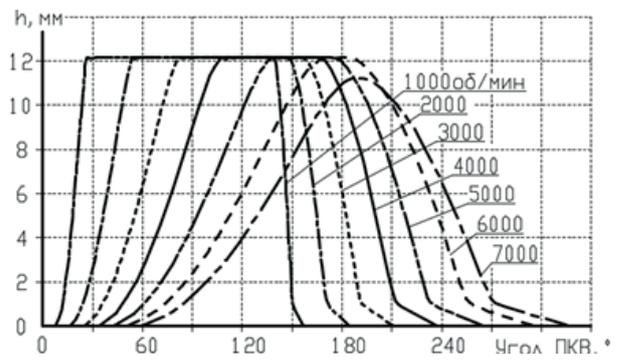


Рис. 6 – Зависимость высоты подъема клапана от угла поворота коленчатого вала при различных частотах его вращения

7. Оценивали влияние перепада давления на тарелку клапана ДВС на работу привода. Так как наиболее значимый перепад давления, мешающий срабатыванию привода, наблюдается в начале выпуска газов из цилиндра ДВС, то исследовали работу привода выпускного клапана. Моделировали перепад давления на клапан ДВС в диапазоне 0,3...0,8 МПа.

#### Обсуждение

1. Выяснено, что плавное перемещение золотника с конечной скоростью вызывает запаздывание срабатывания гидравлического привода клапанов относительно управляющего сигнала, подаваемого на пьезопривод. Величина запаздывания при выбранных параметрах привода составила 1,2 мс. Наличие запаздывания привода вынуждает вводить упреждение подачи управляющего сигнала на привод золотника. Так как упреждение дается в виде углового сектора поворота коленчатого вала, то с повышением частоты вращения коленчатого вала величина упреждения должна увеличиваться.

2. Выявлено, что величина зазоров в гидроцилиндре и управляющем золотнике практически не влияет на высоту подъема клапана ДВС. Увеличение зазоров вызывает:

- увеличение скорости открытия клапана ДВС и снижение скорости его закрытия за счет повышения давления в верхней полости гидроцилиндра;
- увеличение скорости посадки поршня гидроцилиндра на нижний упор;
- снижение скорости посадки клапана ДВС.

При зазоре свыше 1 % привод не обеспечивает закрытие клапана двигателя.

3. Изменение длины питающей и сливной магистралей в диапазоне 0,5...1 м показало слабое влияние путевых потерь. Увеличение длины

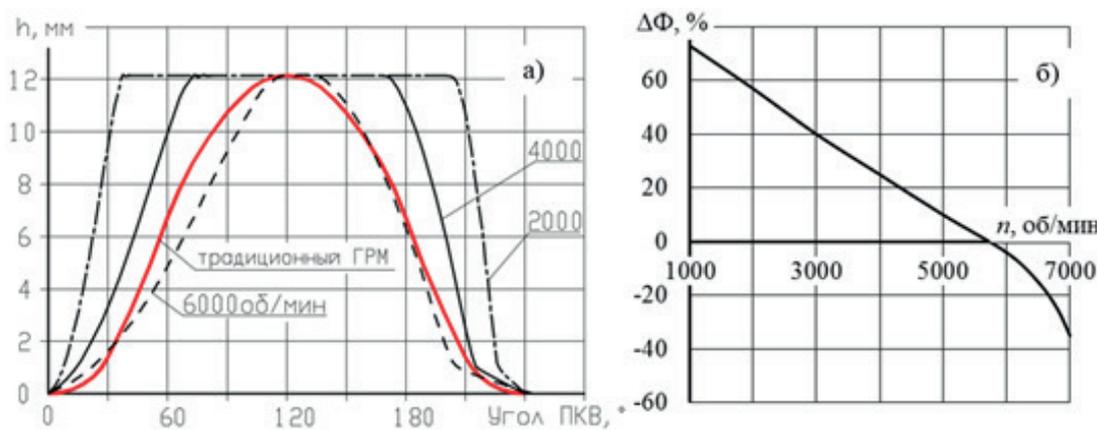


Рис.7 – Сравнение традиционного и гидравлического привода клапанов ДВС:

*а – перемещение клапана  $h$  в зависимости от угла поворота коленчатого вала; б - приращение фактора «время - сечение»  $\Delta\Phi$  в зависимости от частоты вращения коленчатого вала*

магистралей снижает расход масла и скорость перемещения клапана ДВС не более, чем на 2...4 %.

4. Волновые явления могут вызывать значительное снижение давления масла, что провоцирует выделение газовой фазы из рабочего тела, что нарушает стабильную работу гидравлического привода клапанов. Использование гидроаккумулятора объемом 0,2 дм<sup>3</sup> на входе в золотник для гашения колебаний давления частично стабилизировало давление в полостях гидроцилиндра. Амплитуда колебаний давления составила около 0,2 МПа. Отметим, что наличие утечек через зазоры золотника, поршня и штока так же является демпфирующим фактором и способствует гашению колебаний давления масла как слабо сжимаемой жидкости.

5. Исследование влияния температуры масла на работу привода выявило:

- температура масла выше +20°C слабо влияет на работу привода;

- снижение температуры масла уменьшает скорость перемещения поршня гидроцилиндра;

- при температуре масла ниже 0 °C клапан ДВС не поднимается на максимальную высоту;

- при вязкости масла свыше 8800 сСт поршень гидроцилиндра перестает перемещаться;

- минимальная температура масла SAE 10W-30, при которой гидропривод клапана ДВС может обеспечить запуск двигателя, составляет -20 °C (высота подъема клапана двигателя около 6 мм);

- переход на использование масла SAE 0W-30 дает возможность запустить ДВС при меньшей температуре (до -30°C).

Отметим, что влияние температуры масла носит кратковременный характер и после запуска ДВС нивелируется быстрым прогревом масла в приводе в результате трения и взаимодействия с теплыми элементами ДВС.

6. По мере увеличения частоты вращения коленчатого вала скорость открывания и закрывания клапана относительно скорости вращения коленчатого вала уменьшается. Это ведет к уменьшению фактора «время - сечение» с ростом частоты вращения. Также увеличивается фаза открытого состояния клапана ДВС. Для компенсации этого явления необходимо уменьшать время подачи питания на привод золотника. До 6000 мин<sup>-1</sup> при фиксированной фазе питания золотника привод обеспечивает подъем  $h$  клапана на максимальную высоту.

7. Влияние характерного для начала выпуска давления на тарелку клапана ДВС 0,3...0,6 МПа на привод клапанов слабое. Расчеты показали, что при перепаде давления на клапан ДВС менее 0,8 МПа привод обеспечивает надежное перемещение клапана. Отметим, что влияние перепада давления на клапан носит кратковременный характер. При открытии клапана перепад давления на нем резко снижается.

На рисунке 7 показано сравнение фактора «время - сечение» традиционного и гидроприводного газораспределительного механизма при одинаковых фазах открытого состояния клапана. Для традиционного механизма перемещение клапана определяли с помощью метода «полидайн».

Выявлено преимущество гидравлического привода при малой и средней частотах вращения коленчатого вала. При частоте вращения ко-

ленчатого вала свыше 5700 мин<sup>-1</sup> предлагаемый гидравлический привод клапанов не обеспечивает увеличения фактора «время - сечение» по сравнению с традиционным кулачковым приводом.

#### **Заключение**

Проведенное исследование гидропривода клапанов ДВС выявило, что:

- предлагаемый гидропривод имеет достаточное быстродействие для его использования в автотракторных двигателях;
- происходит увеличение пропускной способности органов газораспределения до частоты вращения коленчатого вала 5700 мин<sup>-1</sup>;
- волновые процессы оказывают значительное влияние на работу привода, что требует применения гидроаккумулятора;
- зазоры в гидроцилиндре и управляющем золотнике более 1 % нарушают работу гидропривода;
- при температуре окружающей среды до -30 °С в качестве рабочей жидкости гидропривода можно использовать моторное масло SAE 0W-30.

Следовательно, при модернизации ДВС перспективно использовать гидравлический привод клапанов с электронным управлением, поскольку такой привод позволяет улучшить характеристики двигателя за счет гибкого управления газообменом.

#### **Библиографический список**

1. Балабин, В. Н. Научные основы создания регулируемых приводов газораспределения локомотивных двигателей внутреннего сгорания нового поколения : спец. 05.02.02 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Балабин Валентин Николаевич ; Московский государственный университет путей сообщения. - Москва, 2010. – 292 с.
2. Крайнюк, А. И. Регулируемые системы газораспределения ДВС : монография / А. И. Крайнюк. - Луганск : СГУ им. В. Даля, 2006. – 232 с.
3. Соснин, Д. Автомобильный двигатель без распределительного вала / Д. Соснин // Наука и жизнь. – 2007. - № 10. - URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/11831/>, свободный.
4. Best Motorcycle Technology of 2017. - URL : <https://www.motorcycle.com/mobos/best-technology-of-2017.html?amp> - свободный.
5. Valve Train Components. Technology and Failure Diagnosis Schaeffler Automotive Aftermarket GmbH & Co. KG, September 2012. – 44 p.
6. Toyota Variable Valve Timing. VVT-iE. - URL: [https://www.toyota-club.net/files/faq/16-01-01\\_faq\\_vvt\\_ie\\_eng.htm](https://www.toyota-club.net/files/faq/16-01-01_faq_vvt_ie_eng.htm) - свободный.
7. Audi valvelift system. - URL: [https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/engine-efficiency-technologies/audi-valvelift-system\\_en](https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/engine-efficiency-technologies/audi-valvelift-system_en) - свободный.
8. Численное исследование газораспределительного механизма с электрогидравлическим приводом / А. Б. Березовский, Н. А. Гатауллин, Л. А. Зими́на, А. В. Максимов, Д. Х. Валеев, И. Ф. Гумеров, Р. Х. Хафизов // Журнал автомобильных инженеров. - 2015. - № 5(94). - С. 16-22.
9. Экспериментальное исследование газораспределительного механизма с электрогидравлическим приводом / А. Б. Березовский, А. В. Максимов, Н. А. Гатауллин, Л. А. Зими́на, М. Ф. Садыков, И. Ф. Гумеров, Д. Х. Валеев // Двигателестроение. - 2016. - № 1(263). - С. 11-17.
10. Электрогидравлический привод газораспределительного механизма ДВС / А. В. Максимов, А. Б. Березовский, Н. А. Гатауллин, Л. А. Зими́на / Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности : сборник трудов конференции. - Казань, 2014. - С. 238-241.
11. Freevalve – Koenigsegg. - URL: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/freevalve-koenigsegg/> - свободный.
12. Британские инженеры «оцифровали» распределительный вал ДВС. - URL: <https://hightech.fm/2018/01/22/combustion-engine> - свободный.
13. Большенко, И. А. Электромагнитный привод клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания : спец. 05.09.01: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Большенко Ирина Александровна ; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск, 2015. – 207 с.
14. Ахтариев, М. Р. Улучшение технико-экономических и экологических показателей дизельного двигателя путем завихрения заряда дополнительной подачей воздуха : спец. 05.04.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ахтариев Марс Рифкатович ; Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – Казань, 2001. – 218 с.
15. Козлов, В. И. Повышение топливной экономичности дизелей с помощью системы отклю-

чения цилиндров и циклов / В. И. Козлов, Н. Н. Патрахальцев, М. В. Эммил // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2008. - № 2. - С. 18-20.

16. Галиуллин, Р. Р. Регулирование двигателя отключением цилиндров – как фактор повышения экономичности его работы / Р. Р. Галиуллин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2007. – № 10. – С. 11-13.

17. Неговора, А. В. Специализированное устройство для исследования закона подачи топлива в системах питания дизелей / А. В. Неговора, А. И. Низамутдинов, Р. Т. Хакимов // Технические проблемы сервиса. - 2014. - № 3(29). - С. 11-13.

## COMPUTATIONAL STUDY OF HYDRAULIC DRIVE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE VALVES

**Maksimov A. V.<sup>1</sup>, Zimina L. A.<sup>1</sup>, Kurdyumov V. I.<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>FSBEI HE “Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI “  
420111, Russian Federation, Kazan, K. Marx st., 10,  
Tel. 8 (843) 231-02-02, 89276713976**

**E-mail: larek.adis@mail.ru**

**<sup>2</sup>FSBEI HE Ulyanovsk SAU**

**432017, Russian Federation, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1  
Tel. 8 (8422) 55-95-95**

**E-mail: amibzhd@yandex.ru**

*Key words: automotive machinery, engine, valves, hydraulic drive, computational model, “time-section” factor.*

*The efficiency of agricultural automotive machinery largely depends on the engine quality. The characteristics of an internal combustion engine depend on the quality of gas exchange between its cylinders and the environment. The mechanical drive of the valves of the gas distribution mechanism does not allow to improve gas exchange for all operating modes of the engine. To improve the performance of the internal combustion engine, an electronically controlled accumulator hydraulic valve drive, independent of the crankshaft position, is proposed. Such drive provides flexibility in controlling the valve open time and the moment of its opening, while possessing sufficient compactness and speed. The scheme of such drive with a two-way hydraulic power cylinder which is controlled by a slide valve with a piezomechanical drive is proposed. The choice of the distributor drive is conditioned by its high speed. This actuator is powered by the electronic unit of engine control. The drive working body is the engine oil. To study the influence of various factors on hydraulic drive operation, a computational model was compiled in Simulink environment. It takes into account the path and local losses of oil pressure, inertial phenomena of the liquid column, friction in the drive elements of the engine valve, fluid leakage through the gaps. Computational studies of hydraulic drive were carried out on the basis of the model. The influence of oil leaks and wave phenomena in the drive lines, oil temperature, crankshaft rotation speed and pressure drop on the engine valve plate on its operation was revealed. It is proved that the actuator remains operational down to -20 °C when using SAE 10W-30 oil, has sufficient response speed and provides greater valve capacity compared to valves with a traditional drive up to 5700 rpm.*

### **Bibliography:**

1. Balabin, V.N. Scientific foundations for creating adjustable gas distribution drives for new generation locomotive internal combustion engines: spec. 05.02.02: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Balabin Valentin Nikolaevich; Moscow State Transport University. - Moscow, 2010. - 292 p.
2. Krainyuk, A.I. Adjustable gas distribution systems for internal combustion engines: monograph / A.I. Krainyuk. - Lugansk: East Ukrainian National University named after V. Dahl, 2006. - 232 p.
3. Sosnin, D. Automobile engine without a camshaft / D. Sosnin // Science and life. - 2007. - №10. - URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/11831/>, free.
4. Best Motorcycle Technology of 2017. - URL: <https://www.motorcycle.com/mobos/best-technology-of-2017.html?amp-free>.
5. Valve Train Components. Technology and Failure Diagnosis Schaeffler Automotive Aftermarket GmbH & Co. KG, September 2012.- 44 p.
6. Toyota Variable Valve Timing. VVT-iE. - URL: [https://www.toyota-club.net/files/faq/16-01-01\\_faq\\_vvt\\_ie\\_eng.htm](https://www.toyota-club.net/files/faq/16-01-01_faq_vvt_ie_eng.htm) - free.
7. Audi valvelift system. - URL: [https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/engine-efficiency-technologies/audi-valvelift-system\\_en](https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/engine-efficiency-technologies/audi-valvelift-system_en) - free.
8. Computational study of a gas distribution mechanism with an electrohydraulic drive / A.B. Berezovskiy, N.A. Gataullin, L.A. Zimina, A.V. Maksimov, D. Kh. Valeev, I.F. Gumerov, R. Kh. Khafizov // Journal of Automotive Engineers. - 2015. - № 5 (94). - P. 16-22.
9. Experimental study of a gas distribution mechanism with an electrohydraulic drive / A. B. Berezovskiy, A. V. Maksimov, N. A. Gataullin, L. A. Zimina, M. F. Sadykov, I. F. Gumerov, D. Kh. Valeev // Engine construction. - 2016. - №1 (263). - P. 11-17.
10. Electrohydraulic drive of a gas distribution mechanism of the internal combustion engine / A. V. Maksimov, A. B. Berezovskiy, N. A. Gataullin, L. A. Zimina / Search for effective solutions in the process of creating and implementing scientific developments in the Russian aviation and rocket and space industries : collection of proceedings of the conference. - Kazan, 2014.- P. 238-241.
11. Freevalve - Koenigsegg. - URL: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/freevalve-koenigsegg/> - free.
12. British engineers “digitized” the internal combustion engine camshaft. - URL: <https://hightech.fm/2018/01/22/combustion-engine> - free.
13. Bolshenko, I.A. Electromagnetic drive of the valve of the gas distribution mechanism of the internal combustion engine: spec. 05.09.01: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Bolshenko Irina Aleksandrovna; South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov. - Novocherkassk, 2015.- 207 p.
14. Akhtariev, M.R. Improvement of the technical, economic and environmental performance of a diesel engine by swirling the charge by additional air supply: spec. 05.04.02: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Akhtariev Mars Rifkatovich; Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. - Kazan, 2001.- 218 p.
15. Kozlov, V. I. Fuel efficiency improvement of diesel engines by means of a shutdown system of cylinders and cycles / V. I. Kozlov, N. N. Patrahaltsev, M. V. Emmil // Tractors and agricultural machines. - 2008. - № 2. - P. 18-20.
16. Galiullin, R.R. Engine regulation by turning off the cylinders - as a factor in increasing the efficiency of its work / R.R. Galiullin // Tractors and agricultural machines. - 2007. - №10. - P. 11-13.
17. Negovora, A. V. A special purpose device for studying the law of fuel supply in diesel power systems / A. V. Negovora, A. I. Nizamutdinov, R. T. Khakimov // Technical and technological problems of service. - 2014. - № 3 (29). - P. 11-13.