На правах рукописи

ШАМУКАЕВ Сергей Борисович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Габдрафиков ФанильЗакариевич

Официальные оппоненты: **Галиуллин Рустам Рифович**
доктор технических наук**,** кафедра «Электроснабжения и применения электрической энергии в сельском хозяйстве»
ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ,
заведующий кафедрой

Костарев Константин Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра «Тракторы и автомобили»
ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 29 ноября 2013г. в 13^{00}ч. на заседании диссертационного совета ДМ 220.003.04 в ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ по адресу: 450001, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34, аудитория 259/3, Тел.: (347) 228-91-77.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО БашкирскийГАУ.

Автореферат разослан «____»_____2013г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук,
профессор Мударисов С.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.В условиях сельскохозяйственного производства машинно-тракторные агрегаты (МТА) работают в широких интервалах нагрузочных и скоростных режимов, причем в условиях постоянно меняющихся нагрузок.

Такие условия эксплуатации обусловливают существенное снижение эффективности функционирования МТА из-за ухудшения работы системы топливоподачи дизеля, в частности равномерности подачи топлива, связанное с большой инертностью регулятора топливного насоса при изменение внешних условий работы.

Задача обеспечения эффективности функционирования техники может успешно решаться при эксплуатации ее с учетом конкретных условий сельскохозяйственного производства.

Одним из возможных путей решения этой задачи для дизелей с системой топливоподачи непосредственного действия с регулятором центробежного типа, уже хорошо доведенного конструктивно и надежного в эксплуатации, может быть совершенствование управления системой топливоподачи.

Исследования направленные на повышение эффективности функционирования МТА электронным регулированием топливоподачи, путем позиционного воздействия являются актуальными.

Работа выполнена в соответствии с научно-исследовательской и опытно-конструкторской программой на 2010 – 2012 гг. «Разработка систем управления дизельными двигателями» (Рег. № 01.2010.58514) на кафедре «Теплотехника и энергообеспечение предприятий» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ.

Степень разработанности.Существующие регуляторы систем топливоподачи дизелей основаны на технологии, направленной на поддержание постоянства угловой скорости коленчатого вала двигателя. В дизелях МТА актуальным является снижение инертности регулятора с дополнительным позиционным воздействием по нагрузке, для осуществления которого в настоящий момент не разработана технология и технические средства реализации этого способа.

Цель работы.Повышение эффективности функционирования дизеля МТАсовершенствованием управления системой топливоподачи.

Объект исследований. Процесс взаимодействия системы регулятор-дизельный двигатель с топливной системой непосредственного действияна неустановившихсярежимах функционированиядизеля МТА.

Предмет исследований.Параметры процесса взаимодействия дизельного двигателя и регулятора топливного насоса на частичных и неустановившихся режимах работы МТА с целью снижения инертности действия регулятора.

Научная новизна.1)Разработана математическая модель функционирования системы топливоподачи дизеля МТА с дополнительным позиционным воздействием на орган управления по нагрузке.2) Установлена зависимость изменения угловой скорости коленчатого вала двигателя от относительного изменения положения органа управления топливоподачей насоса высокого давления с учетом нагрузки на МТА.

Новизна конструктивных решений подтверждена патентами на изобретение «Электронный регулятор частоты вращения дизельного двигателя» №2363855 от 10.08.2009 г. и №2449148 «Электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя» от 27 апреля 2012 г.

Вклад автора в проведенное исследование:

- теоретическое обоснование возможности повышения эффективности функционирования МТА на неустановившихся режимах работы с применением дополнительного позиционного воздействия на орган управления по нагрузке;

-разработка технических средств, для реализации предложенного способа регулирования топливоподачи в дизельный двигатель;

- стендовые и полевые экспериментальные исследования дизелей МТА на неустановившихся режимах с применением разработанных технических средств.

Практическая ценность работы заключается в усовершенствовании устройств и систем автоматического управления подачей топлива, позволяющих производить перемещение органа управления топливного насоса с высокой скоростью и высокой точностью позиционирования. Система автоматического управления, использующая дополнительное воздействие по нагрузке позволяет корректироватьподачу топлива в зависимости от величины нагрузки на МТА и тем самым снизитьинертность регулятора обеспечивая улучшение динамических свойств двигателя МТА на неустановившихся режимах.

Методы исследований и достоверность результатов.Теоретические исследованиябазировались на теории автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания, теории трактора и автомобиля.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются применением в экспериментальных исследованиях сертифицированных средств испытания и измерения показателей топливоподачи дизелей, а также удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальныхданных.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и одобрены на научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ» (2007-2013гг.), ФГБОУ ВПО «Челябинский ГАУ» (2008 г.),ФГБОУ ВПО «Ставропольский ГАУ» (2012 г.),ФГБОУ ВПО «Казанский ГАУ» (2012 г.).

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них три работы в изданиях рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, две работы без соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованной литературы из 116 наименований и приложения. Диссертация изложена на 117 с., содержит 9 таблиц, 57 рисунков и 9 с. приложения.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

1. Математическая модель функционирования системы топливоподачи дизеля МТА с дополнительным воздействием в регуляторе по нагрузке.
2. Технология регулирования топливоподачи дизеля МТАпозиционным воздействием на орган управления подачей топлива.
3. Уточнённая динамическая модель переходного процесса дизельного двигателя МТА.
4. Результаты лабораторно-стендовых и производственных исследований разработанных устройств управления подачей топлива.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и необходимость ее разработки, изложена общая характеристика работы, цель и задачи исследований, научные положения выносимые на защиту.

В первом разделе«Состояние вопроса, цели и задачи исследования» проведен анализ особенностей изменения внешней нагрузки на двигатели МТА, а также рассмотрены особенности изменения показателей работы двигателя на регуляторной ветви скоростной характеристики и системы автоматического регулирования скоростным режимом в условиях неустановившейся нагрузки.

В процессе эксплуатации дизели МТА из-за влияния неустановившегося режима не обеспечивают запроектированных и полученных на стенде по ГОСТ показателей работы. Среди причин, обуславливающих это явление, наиболее важным оказалось изменение внешней нагрузки на двигатели внутреннего сгорания.

Для характеристики неустановившихся и частичных режимов применяются несколько показателей, период изменения момента сопротивления Т,степень неравномерности момента сопротивления δ и коэффициент возможности увеличения нагрузки υ. Однако существующие системы управления и регулирования подачи топлива в двигателе не учитывают изменения этих параметров.

Большой научный вклад в исследование проблем регулирования дизельных двигателей при неустановившейся и частичной нагрузке в области тракторных дизелей внесли: В.Н. Болтинский, Н.С. Ждановский, В.И. Анохин, В.И. Крутов, Р.М. Баширов, Д.Д. Багиров, А.Б. Лурье, В.С. Шкрабак, Ю.К. Киртбая, Ф.З. Габдрафиков, А.П. Иншаков, О.Б. Леонов,И.И. Габитов,Е.В. Исаев, А.К. Юлдашев, А.М.Гусячкин, М.Ш. Гумеров, Ф.Х. Халиуллин, С.А. Синицкий, В. Г. Патока, В.М. Медведев, Д.А. Вахромееви др.

На основе проведенного обзора и анализа состояния проблемы и в соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие основные **задачи исследования:**

- выявить технологические особенности повышения динамических свойств дизельного двигателя с учетом его работы на неустановившихся и частичных режимах;
- теоретически изучить закономерности и обосновать параметры взаимодействия момента сопротивления, частоты вращения и величины подачи топлива на неустановившихся и частичных режимах;
- усовершенствовать и обосновать схему устройств обеспечивающих возможность регулирования подачи топлива в зависимости от момента сопротивления на неустановившихся и частичных режимах;
- выполнить экспериментальные исследования с целью проверки результатов теоретических исследований и обоснования конструктивных параметров и режимов работы усовершенствованной автоматической системы управления и регулирования;
- провести экономическое обоснование результатов исследований.

Во втором разделе«Математическое описание работы дизеля МТА с дополнительным воздействием по нагрузке» приведено теоретическое обоснование параметров устройства обеспечивающего регулирование топливоподачи на неустановившихся режимах в зависимости от нагрузки.

Для математического описания регулирования топливоподачи на неустановившихся режимах дизельный двигатель МТА рассматривается как элемент сложной динами-

ческой системы. Динамические характеристики дизеляи топливной аппаратуры должны быть согласованы с характером нагружения.Улучшения процесса топливоподачи можно добиться снижением инертности действия регулятора топливнойаппаратуры.

Переходной процесс дизельного двигателя на неустановившихся режимах, при рассмотрении малых отклонений параметров, можно смоделировать четырьмя основными воздействиями (рисунок 1, таблица 1).

В случае если переходной процесс возникает в связи с уменьшением момента сопротивления (M_c)до значения в точке 3 (рисунок 1а) происходит резкое увеличение частоты вращения(n), при этом избыток крутящего момента (M_e)расходуется на увеличение энергии инерционной массы($E_м$) двигателя путем увеличения ее частоты вращения (в случае машинного агрегата необходимо также учитывать инерционную массу трансмиссии и инерцию машинного агрегата в целом). Крутящий момент M_e снижается до точки 4 из-за снижения подачи топлива обусловленной реакцией регулятора на увеличение n. При выравнивании значений M_eи M_c дальнейшее увеличение$\omega_Д$предотвращается. Рабочий процесс двигателя смещается в точкуB. В рассмотренном переходном процессе моментом, влияющим на изменение $\omega_Д$, является M_e, увеличивающий запас энергии в инерционной массе двигателя, путем увеличения угловой скорости ее вращения или перемещенияhtqrb.

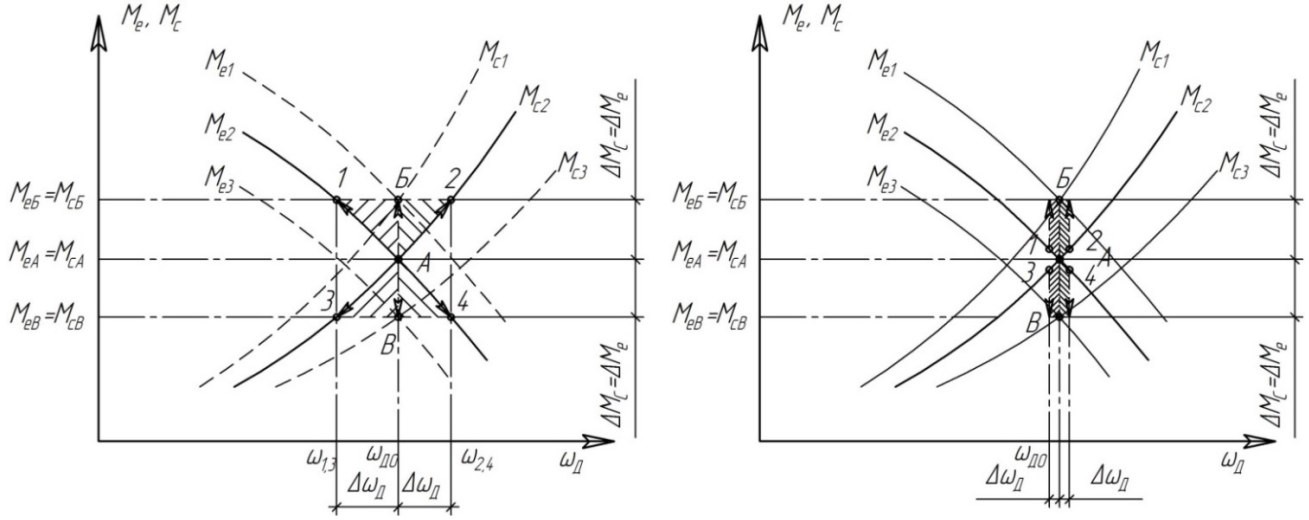


Рисунок 1 Графическое отображение динамической модели переходных процессов дизельного двигателя.

Таблица 1 Переходные процессы дизельного двигателя.

Наименование	M_c	M_e	$\omega_Д$	$E_м$	точка
УвеличениеM_c	↑	↑	↓	$E_м$расходуется наM_c	*Б*
УменьшениеM_c	↓	↓	↑	M_eпополняет$E_м$	*В*
УвеличениеM_e	↑	↑	↑	M_eпополняет$E_м$	*Б*
УменьшениеM_e	↓	↓	↓	$E_м$расходуется наM_c	*В*

В случае увеличения M_c до значения в точке 2, произойдет поглощение запаса энергии инерционной массы двигателя нагрузкой и снижение$\omega_Д$вращения. При этом M_eиз-за снижения$\omega_Д$повышается до точки 1. Равновесное состояние устанавливается в точке *Б*. Влияющим моментом в этом случае является M_eвосполняющий нехватку момента сопротивления M_c.

Площади соответствующих треугольников (рисунок 1), например А-1-Б и А-2-Б всегда равны и соответствуют работе действующих сил при переходе из одного равновесного состояния в другое. В результате переходного процесса эти работы вычи-

таются, так как силы направлены противоположно друг к другу. Колебания$\omega_Д$ возникают в виду неравновесного изменения действующих моментов во времени.

Основными определяющими параметрами динамической системы влияющими на время переходного процесса являются энергия инерционной массы и скорость ее расходования или восполнения.Повышения динамических свойств системы, представляется только в случаях, когда энергия инерционной массы не используется (используется минимально) либо скорость ее восполнения и расходования очень высока.

Минимального использования энергии$E_м$возможно добиться использованием системы автоматического регулирования и управления с дополнительным воздействием по моменту сопротивления.

Для исключения вредного воздействия высокочастотных колебаний необходимо задаться степенью нечувствительности регулятора к приложенным моментам δ (рисунок 1б).

При выходе моментов за пределы нечувствительности регулятора (рисунок 1б) двигатель за счет увеличения подачи топлива имеет возможность компенсировать изменение нагрузки. Регулирование происходит за счет использования мощности двигателя, изменяя крутящий момент в противовес моменту сопротивления или наоборот.

Объектом для регулирования является дизель МТА входным параметром которого будет цикловая подача $g_ц$, а выходным - $\omega_Д$и M_e(рисунок 2).

Регулятор осуществляет регулирование двигателем через входной параметр$\omega_Д$и относительное изменение момента ΔM. Положение рейки топливного насоса h_p является выходным параметром регулятора. В соответствии с заданнымh_p и $\omega_н$ (угловая скорость кулачкового вала насоса) насос обеспечивает цикловую подачу $g_ц$.

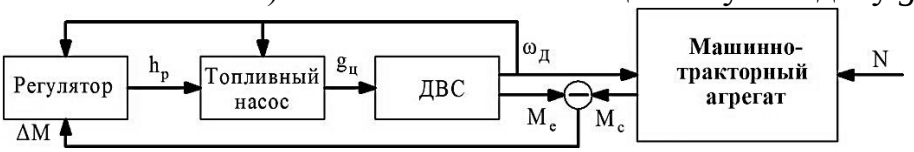


Рисунок 2Схемафункционирования системы топливоподачинепосредственного действия дизеля МТА.

Рабочий процесс дизельного двигателя МТА в реальных условиях эксплуатации может быть описана уравнением для неустановившихся режимов и имеет следующий вид:

$$J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt} = \Delta M_e - \Delta M_c, \quad (1)$$

где $J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt}$- изменение момента инерции подвижных частей;ΔM_e – изменение крутящего момента;ΔM_c – изменение момента сопротивления.

Раскрыв ΔM_e и ΔM_cзапишем:

$$J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt} = \frac{\partial M_e}{\partial \omega_Д}\Delta\omega_Д + \frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\Delta g_ц - \frac{\partial M_C}{\partial \omega_Д}\Delta\omega_Д - \frac{\partial M_C}{\partial N}\Delta N. \quad (2)$$

где$\Delta\omega_Д$ – изменение угловой скорости; $\Delta g_ц$ – изменение цикловой подачи топлива;

Изменение $\Delta g_ц$с учетом регулирования дизельного двигателя по нагрузке, на МТА можно выразить через ΔN:

$$\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\Delta g_ц = \frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\cdot\frac{\partial g_ц}{\partial N}\cdot\Delta N \quad (3)$$

Тогда после преобразованийполучим:

$$J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt} + \left[\frac{\partial M_C}{\partial \omega_Д} - \frac{\partial M_e}{\partial \omega_Д} \right] \cdot \Delta\omega_Д = \left[\frac{\partial M_e}{\partial g_ц} \cdot \frac{\partial g_ц}{\partial N} - \frac{\partial M_C}{\partial N} \right] \cdot \Delta N. \quad (4)$$

Обозначим:

$F_g = \frac{\partial M_C}{\partial \omega_Д} - \frac{\partial M_e}{\partial \omega_Д}$ - фактор устойчивости; (5)

$K_{M_e g_ц N} = \frac{\partial M_e}{\partial g_ц} \cdot \frac{\partial g_ц}{\partial N}$ - коэффициент влияния $M_e \leftarrow g_ц \leftarrow N$; (6)

$K_{M_C N} = \frac{\partial M_C}{\partial N}$ - коэффициент влияния $M_c \leftarrow N$; (7)

Тогда:

$$J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt} + F_g \cdot \Delta\omega_Д = \left[K_{M_e g_ц N} - K_{M_C N} \right] \cdot \Delta N. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \quad \alpha_g = \frac{\Delta N}{N_0}; \quad J_Д \frac{d\Delta\omega_Д}{dt} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0} = J_Д \frac{d\varphi}{dt} \omega_0 . \quad (9) \quad (10) \quad (11)$$

После подстановки и преобразований получим:

$$T_g \cdot \frac{d\varphi}{dt} + K_g \cdot \varphi = \alpha_g . \quad (12)$$

где $T_g = \frac{J_Д \cdot \omega_0}{(K_{M_e g_ц N} + K_{M_c N}) \cdot N_0}$ - «динамическое время двигателя по нагрузке»; (13)

$K_g = \frac{F_g \cdot \omega_0}{(K_{M_e g_ц N} + K_{M_c N}) \cdot N_0}$ - «динамический коэффициент самовыравнивания по нагрузке». (14)

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\varphi = \frac{\alpha_g}{K_g} \left(1 - e^{-\frac{K_g \cdot t}{T_g}} \right) \quad (15)$$

Нарушение равновесного состояния может произойтии в результате процессов не связанных с системой топливоподачи, поэтому уравнение (12) рассмотрим совместно с классической математической моделью дизельного двигателя, регулирование которого происходит по угловой скорости:

$$T_g' \cdot \frac{d\varphi}{dt} + K_g' \cdot \varphi = \phi_g - \alpha_g \cdot \Theta_g \quad (19)$$

где $T_g' = \frac{J_Д \cdot \omega_0}{K_{M_e g_ц} \cdot g_{ц0}}$ - динамическое время двигателя; (20)

$K_g' = \frac{F_g \cdot \omega_0}{K_{M_e g_ц} \cdot g_{ц0}}$ - динамический коэффициент самовыравнивания; (21)

$\Theta_g = \frac{K_{M_C N} \cdot N_0}{K_{M_e g_ц} \cdot g_{ц0}}$ - коэффициент усиления по нагрузке; (22)

$\phi_g = \frac{\Delta g_ц}{g_{ц0}}$ - относительное изменение положения рейки. (23)

Получим:

$$T_g{}' \cdot \frac{d\varphi}{dt} + K_g{}' \cdot \varphi = \phi_g - (T_g \cdot \frac{d\varphi}{dt} + K_g \cdot \varphi) \cdot \Theta_g \quad (24)$$

После преобразований получим:

$$T_g{}'' \cdot \frac{d\varphi}{dt} + K_g{}'' \cdot \varphi = \phi_g \quad (25)$$

где $T_g{}'' = J_Д \cdot \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{K_{M_cN}}{(K_{M_e g_{ц} N} + K_{M_cN})}\right)$ - динамическое время двигателя; (26)

$K_g{}'' = F_g \cdot \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{K_{M_cN}}{(K_{M_e g_{ц} N} + K_{M_cN})}\right)$ - коэффициент самовыравнивания двигателя.(27)

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\varphi = \frac{\phi_g}{K_g{}''} \left(1 - e^{-\frac{K_g{}'' \cdot t}{T_g{}''}}\right) \quad (28)$$

Зависимость (28) представляет собой изменение угловой скорости коленчатого вала двигателя от относительного изменения положения органа управления топливоподачей топливного насоса с учетом нагрузки на МТА.

В соответствии с задачами исследования на кафедре «Теплотехника и энергообеспечение предприятий» Башкирского ГАУ было разработано электронное устройствопозиционного воздействия на органы управления топливоподачей дизельного двигателя с дополнительным импульсом по нагрузке (Н-корректор) применительно к тракторным дизелямД-144 и Д-243(патенты на изобретение Российской Федерации №2363855 «Электронный регулятор частоты вращения дизельного двигателя»,№2449148 «Электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя»).

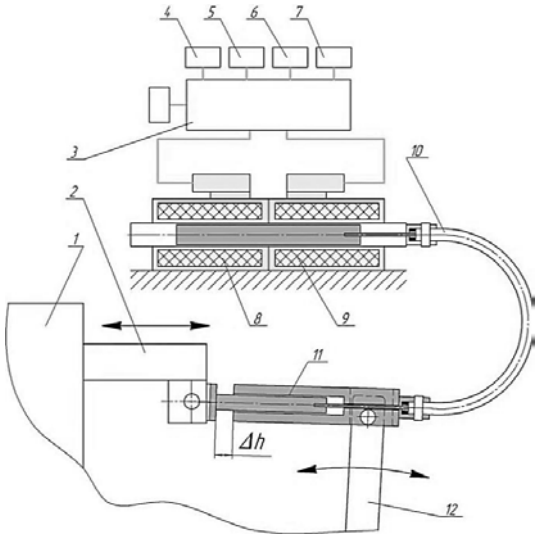


Рисунок 3 Функциональная схема электронного позиционирующего устройства регулятора ТНВД.

Электронное устройствопозиционного воздействия на органы управления топливоподачей дизельного двигателя с дополнительным импульсом по нагрузке (рисунок 3) устанавливается между рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД) и рычагом механического регулятора вместо серийной тяги, что позволяет, в небольшом интервале на всех режимах корректировать положение рейки и соответственно подачу топлива.

Длинна выбега *Δh*позиционирующего устройства изменяется за счет электромагнитного привода, с которым он соединен посредством гибкой тросовой связи. Такое технологическое решениепозволяет сохранить общую подвижность элементов конструкции механического регулятора обеспечиваявсережимное регулирование двигателя по угловой скорости.

Необходимое положение органа управления (рейки) 2 ТНВД 1 определяется блоком управления 3 по сигналам датчиков частоты вращения 4, нагрузки на МТА 5 и положения рычага управления 6, а действительное - датчиком 7 положения органа управления. Действительное и требуемое положение органа управления сравниваются

в блоке управления 3. При их несоответствии на электромагниты 8 и 9, якоря которых жестко связаны друг с другом, позиционирующим устройством (посредством троса) и рейкой ТНВД,подается напряжение U_1 и U_2 для корректирования.

В третьем разделе«Общая программа и методика экспериментальных исследований» изложены общие положения, цели и задачи исследования, описание лабораторных установок и принципа их действия, а также задаваемые и изучаемые параметры.

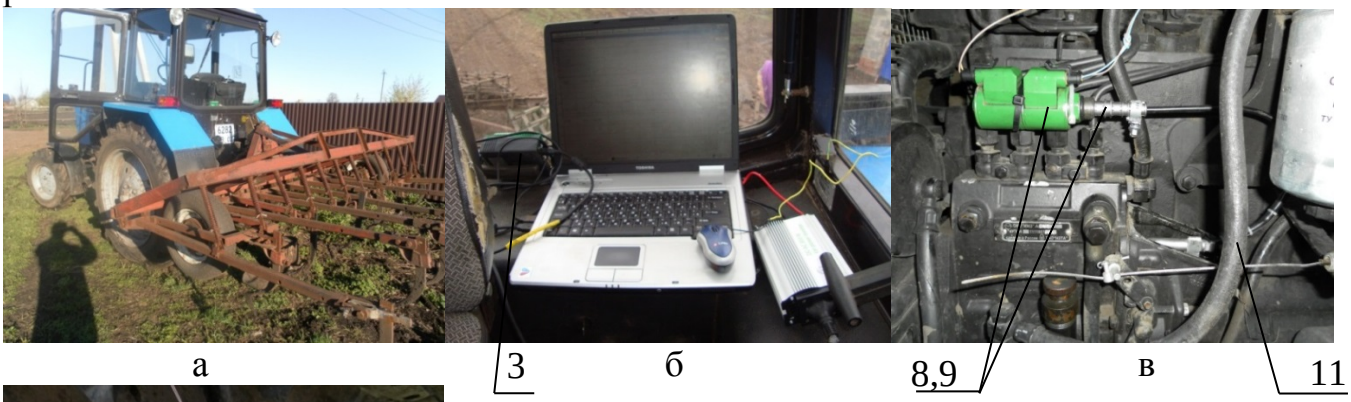


Рисунок 4 Экспериментальный МТА: а – трактор МТЗ-82.1 с культиватором КПС-4ПН; б - блок управления с контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратурой; в - электронное устройство позиционного воздействия на двигателе Д-243 трактора МТЗ-82.1 с ТНВД 4УТНИ; г - датчик нагрузки на основе тензорезисторов смонтированный на оси продольных тяг навесного устройства.

Экспериментальные исследования включали следующие этапы:

- сравнительные безмоторные испытания ТНВД с использованием стандартного всережимного регулятора и с электронным устройством позиционного воздействия на рейку ТНВД.

- моторные исследования стационарных характеристик испытываемого двигателя с использованием стандартного всережимного регулятора и с электронным устройством позиционного воздействия на рейку ТНВД.

- моторные исследования динамических характеристик двигателя при использовании всережимного регулятора частоты вращения коленчатого вала двигателя и при использовании разработанного экспериментального устройства позиционирования;

- полевые испытания дизеля МТА с использованием всережимного регулятора и с электроннымустройством позиционного воздействия нарейку ТНВД.

В качестве объекта исследований в лабораторных условиях выбран дизельный двигатель Д-144. В условиях аграрного производства этот распространенный двигатель значительную часть рабочего времени эксплуатируется на неустановившихся режимах работы.

Объектом исследований в полевых условиях был выбран трактор МТЗ-82.1 с дизельным двигателем Д-243 и топливным насосом 4УТНИ.Регулятор топливного насоса был дополнительно дооборудован электронным устройством позиционного воздействия на рейку ТНВД. Управление осуществлял при помощи блока управления и персонального компьютера в зависимости от изменения нагрузки на МТА. Для определе-

ния относительного изменения нагрузки на МТА на навесном устройстве трактора были установлены датчики на основе тензорезисторов.

В четвертом разделе«Результаты экспериментальных исследований и их анализ»представлены результаты лабораторно-стендовых испытаний топливного насоса 4УТНИ при работе с всережимным регулятором и с разработанным электронным устройством позиционного воздействия.

Амплитуда колебания рейки насоса с механическим регулятором достигала Δ=0,51 мм.При установке электронного устройства позиционированияона составила всего Δ=0,12мм, (на 45% меньше),что способствовалосущественному снижению неравномерности топливоподачи.Так межсекционная неравномерность топливоподачи (δ) ТНВД при работе с электронным устройством позиционирования в зависимости от частоты вращения коленчатого вала снизилась на 2-7% (рисунок 5).

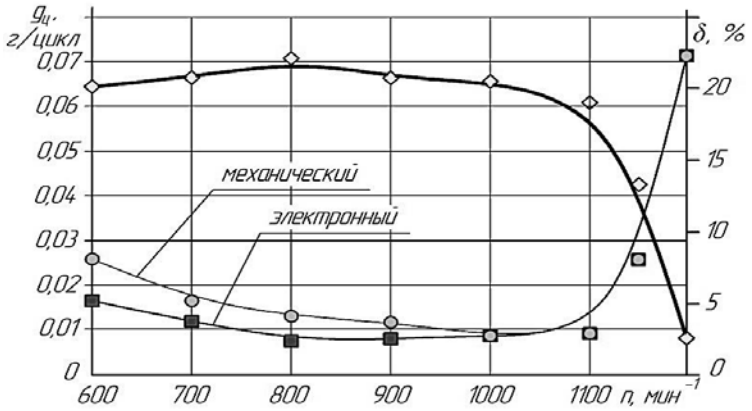


Рисунок 5 Регуляторная характеристика насоса 4УТНИ для дизеля Д-243 и неравномерность топливоподачи при работе с всережимным механическим и экспериментальным электронным устройством позиционного воздействия на рейку.

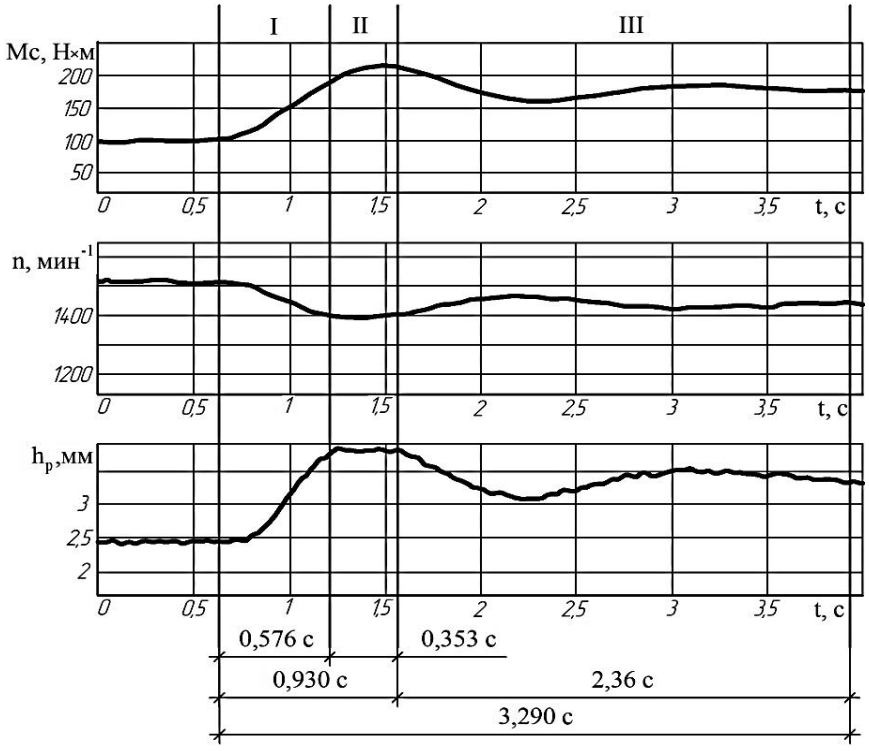
Переходные процессы (изменение момента сопротивления, частоты вращения коленчатого вала и положения рейки) двигателя Д-144 с всережимным механическим регулятором характеризуются колебанием всех контролируемых показателей (рисунок 6). Величина фазового отставания положения рейки топливного насоса от начала изменения момента сопротивления составляет 0,15 с (связанно с задержкой снижения частоты вращения из-за накапливания энергии в упругих элементах трансмиссии и расходования энергии маховиком двигателя).

Результаты экспериментальных моторных исследований приведены в таблицах 2 и 3.

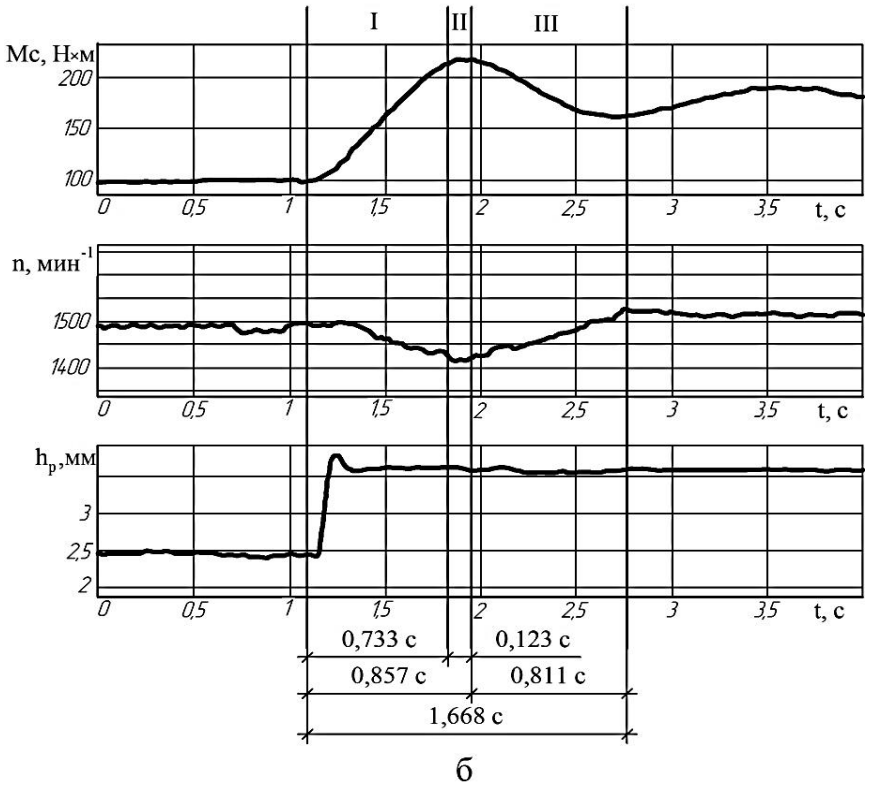
Длительность начальной I фазы переходного процесса «наброс нагрузки» составляет 0,57 с. Длительность II фазы переходного процесса «выравнивание моментов и стабилизация частоты вращения» составляет 0,35 с.III фаза переходного процесса составляет 2,36 с ихарактеризуется колебательным процессом, который является следствием динамического заброса крутящего момента двигателя и высвобождения энергии в упругих элементах трансмиссии.

Таблица 2 Результаты экспериментальных исследований на двигателе с центробежным регулятором при частоте вращения n=1500 мин$^{-1}$, нагрузке M_c = 100 Н·м, положении рейки h_p = 2,45 мм.

Наброс, Н·м	Изменение положения рейки		Заброс момента		Заброс частоты вращения		Установившееся значение частоты, мин$^{-1}$	Время переходного процесса t, с
	мм	%	Н·м	%	мин$^{-1}$	%		
120	2,78	13,47	128	6,67	1480	-1,33	1495	1,3
140	3,2	30,61	159	13,57	1450	-3,33	1470	2,3
160	3,38	37,96	185	15,63	1410	-6,00	1450	2,8
180	3,83	56,33	218	21,11	1390	-7,33	1430	3,5



а



б

Рисунок 6 Осциллограммы переходного процесса с механическим регулятором (а) и электронным устройством позиционного воздействия (б) при n=1500 мин$^{-1}$, Δ M=80 Н·м (100→180 Н·м).

Общая длительность переходного процесса составила до 3,5 с.

Осциллограммы переходных процессов двигателя с экспериментальным регулятором имеет колебательный характер только по моменту сопротивления. Фазовое отставание частоты вращения намного больше 0,3 с.Это является следствием резкого изменения положения рейки корректором момента сопротивления.Рейка топливного насоса изменяет свое положение в течении 0,1 с и имеет задержку от начала переходного процесса 0,05 с.Общая длительность переходного процесса составляет до 2,2 с (на 37% ниже, чем при регуляторе центробежного типа), что позволяет существенно снизить инерционность регулирования.

В первом случае частота вращения коленчатого вала меняется по окончании переходного процесса, а во втором частота возвращается после непродолжительного колебания в исходное значение 1500 мин$^{-1}$ (таблица 2, 3).

Исследования показали, что при использовании электронного устройства позиционирования с регулированием по частоте вращения и нагрузке уменьшается заброс частоты вращения, происходит возрастание мощности двигателя во время переходного процесса.

Интенсивность возрастания крутящего момента позволяет двигателю возникающие перегрузки преодолевать более эффективнои, как следствие, происходит уменьшение удельного расхода топлива (рисунок 7).

Таблица 3 Результаты экспериментальных исследований на двигателе с воздействием в регуляторе по моменту сопротивления при частоте вращения n=1500 мин$^{-1}$, нагрузке M_c = 100 Н·м, положении рейки h_p = 2,45 мм.

Наброс, Н·м	Корректировка положения рейки		Заброс момента		Заброс частоты вращения,		Время переходного процесса, с
	мм	%	Н·м	%	мин$^{-1}$	%	
120	2,76	12,65	128	6,67	1490	-0,67	0,7
140	3,0	22,45	154	10,00	1460	-2,67	1,1
160	3,29	34,29	183	14,38	1440	-4,00	1,2
180	3,55	44,90	217	20,56	1415	-5,67	1,4

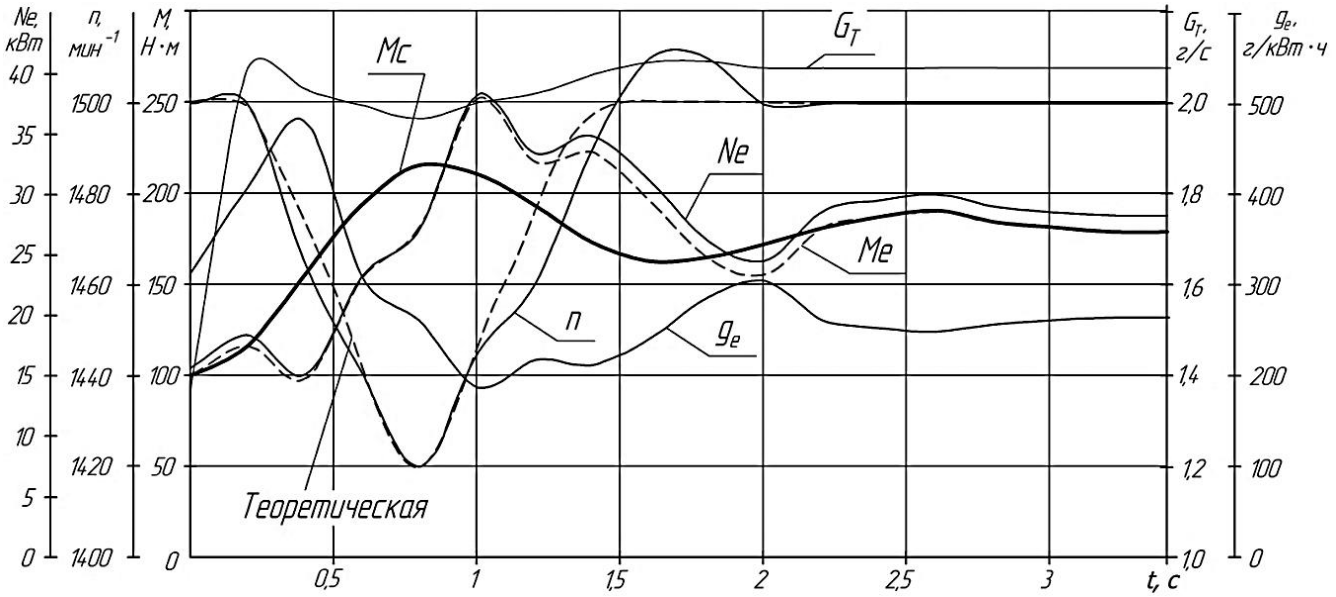


Рисунок 7 Зависимость показателей работы дизеля Д-144 от времени при использовании экспериментального устройства позиционирования.

Экспериментальные полевые испытания МТА (трактор МТЗ-82.1 с культиваторомКПС-4ПН) проводились в условиях земельных угодий КФХ «Алга», Нуримановского района Республики Башкортостан.

Переходные процессы дизеля МТА в полевых условиях регистрировались с помощью специальной аппаратуры, а затем проводилось обобщение и анализ результатов. При проведении испытаний МТА работал на рекомендованных скоростных режимах.

Зависимости изменения показателей двигателя при набросе и сбросе нагрузки в лабораторных, полевых и теоретических исследованиях (рисунок 8, 9) имеют высокую идентичность. При полевых исследованияхбыло выявлено увеличение расхода топлива (объясняется наличием сопротивления перекатыванию МТА по полю).

Полученные зависимости изменения показателей дизеля Д-243 трактора МТЗ-82.1 (рисунок 8), свидетельствуют о значительном влиянии неустановившейся нагрузки на эффективность функционирования дизеля МТА. Так в режиме наброса нагрузки на дизель, за счет дополнительного воздействия в регуляторе ТНВД, подается в двигатель дополнительная порция топлива. Начало увеличения цикловой подачи топлива $g_ц$ практически совпадает с началом изменения нагрузки на крюке $P_{кр}$. Частота вращения коленчатого вала двигателя остается практически неизменной. Начало переходного процесса характеризуется увеличением удельного расхода топлива g_eдо 830 г/кВт·ч, что связанно с затратами топлива на преодоление нагрузки. Среднее значение часового расхода топлива $G_т$ за весь переходной процесс составляет 13,99 кг/ч и составляет в среднем 14,56 кг/ч в конце переходного процесса.

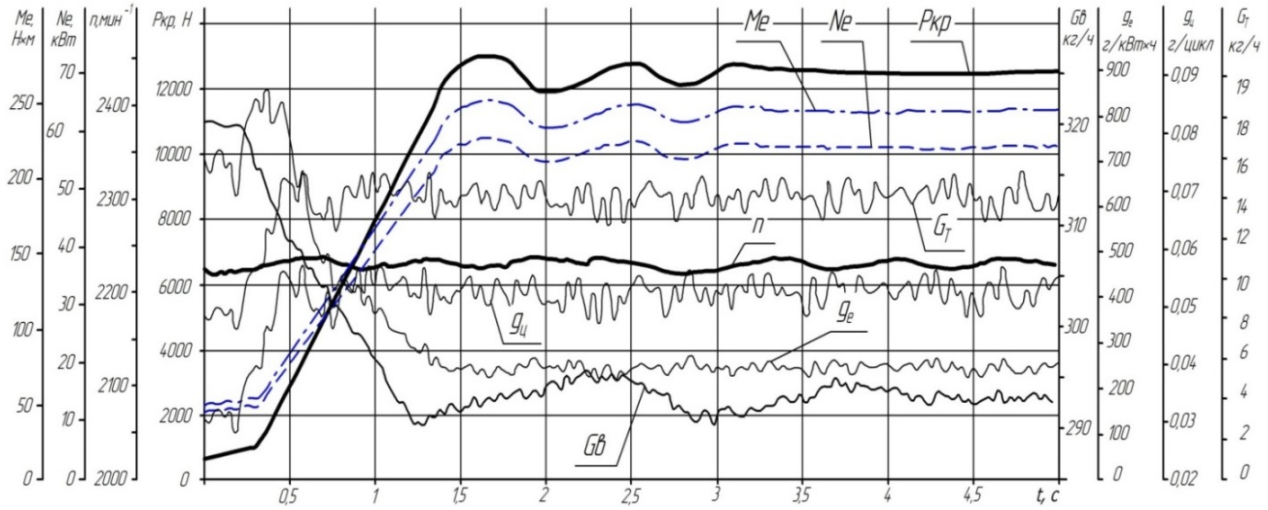


Рисунок 8 Результаты полевых испытаний дизеля Д-243 в неустановившихся режимах - наброс нагрузки

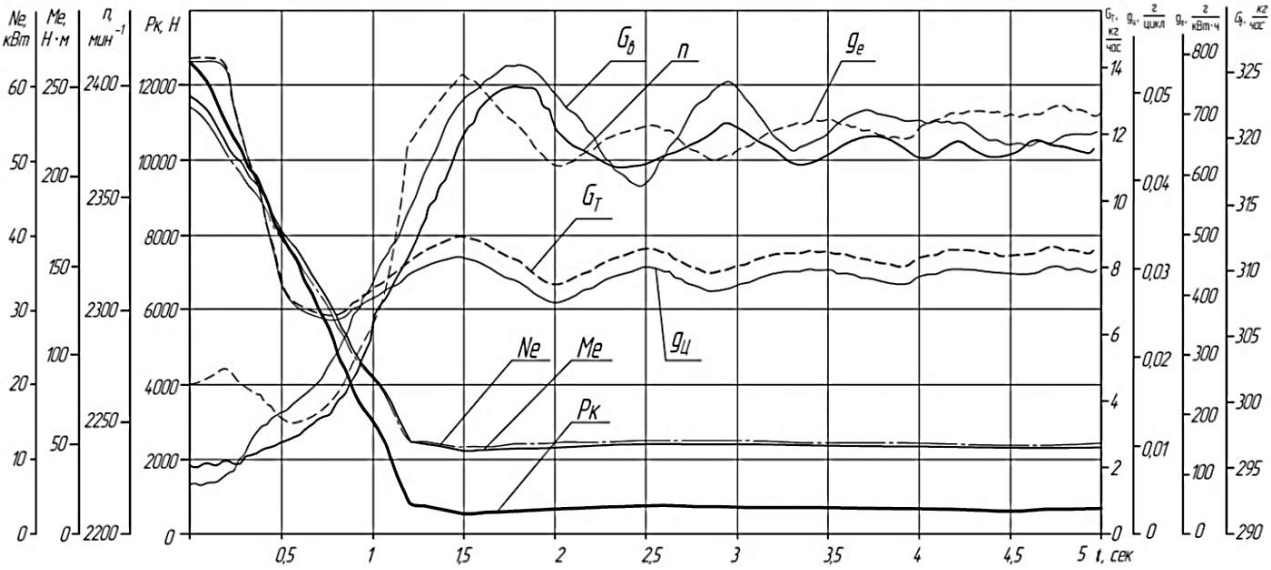


Рисунок 9 Результаты полевых испытаний дизеля Д-243 в неустановившихся режимах - сброс нагрузки.

В режиме сброса нагрузки снижение подачи топлива происходит одновременно со снижением нагрузки (за счет дополнительного воздействия процесс изменения $g_ц$ заканчивается на 0,7 с раньше). В начальный момент времени, в режиме при n=2240 мин$^{-1}$, происходит снижение g_e до 186 г/кВт·ч обусловленное принудительным перемещением рейки ТНВД устройством позиционирования. Средний часовой расход топлива за переходной процесс составляет 8,56 кг/ч.

Результаты полевых испытаний МТА с электронной системой корректировки подачи топлива по нагрузке показали, повышение эффективности функционирования дизеля. Так расход топлива уменьшился на 4…5%, потери мощности двигателя снизились на 3…4% при работе в режимах неустановившихся нагрузок.

В пятом разделе «Технико-экономическое обоснование»Использование электронного устройства позиционного воздействия на органы управления топливоподачей в неустановившихся режимах работы дизельного двигателя Д-243 трактора МТЗ-82.1 позволяет при годовой загрузке МТА 1300 часов сэкономить 1,538 т. дизельного топлива. При средней цене дизельного топлива 27,4 руб. за килограмм годовой экономический эффект составит 42141 рублей на один МТА.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработана модель функционирования топливоподающей системы непосредственного действия дизеля МТА в динамических режимах, представляющая собой совокупность дизельного двигателя, топливного насоса, регулятора и машинно-тракторного агрегата.

2. Разработана математическая модель работы дизельного двигателя МТА, в динамических режимах. Установлена зависимостьотносительного изменения угловой скорости коленчатого вала от относительного изменения положения рейки ТНВД с учетом нагрузки на МТА. Так при относительном изменении нагрузки на 80% происходитотносительное перемещении рейки ТНВД на 1,1 мм и уменьшение угловой скорости коленчатого вала на 6%.

3. Предложеноустройство позиционного воздействия на органы управления топливоподачей дизельного двигателя, позволяющеерегулироватьположение рейки ТНВД в зависимости от нагрузочного режима на МТА (патенты на изобретение №2363855«Электронный регулятор частоты вращения дизельного двигателя» и №2449148 «Электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя»).

4. Установлено на основании моторных и полевых испытаний на неустановившихся режимах работыпотребностьизменения цикловой подачи топлива приизменении момента сопротивления дизеля МТА. При значении степени неравномерности момента сопротивления 0,80 позиционное воздействие на органы управления топливоподачей позволит уменьшить заброс частоты вращения на 1,66%, сократить время переходного процесса на 2,1 с.Расход топлива уменьшился на 4…5%, потери мощности двигателя снизились на 3…4% при работе с неустановившейся нагрузкой.

5. По результатам расчетов технико-экономических показателей дизельного двигателя Д-243 при неустановившейся нагрузке с учетом улучшения динамических характеристик и годовой загрузке 1300 часов позволит сэкономить 1,538 т дизельного топлива, что по ценам на 20.06.2013 г. составит 41526 рублей.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Шамукаев С.Б. Повышение качества топливоподачи в дизелях [Текст] /Ф.З. Габдрафиков, М.А. Абраров// Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2010. - №3. - С.5,6.

2. Шамукаев С.Б. Динамическая модель переходного процесса работы дизельного двигателя[Текст] /Ф.З. Габдрафиков// Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2010. - №9. - С.22 - 24.

3. Шамукаев С.Б. Возможные направления повышения технико-экономических показателей тракторных дизелей [Текст] / С.Б. Шамукаев, Ф. З. Габдрафиков [и др.] // Тракторы и с. - х. машины. - 2011. - № 2. - С. 23-27

в авторских свидетельствах и патентах

1. Электронный регулятор частоты вращения дизельного двигателя[Текст]: пат. 2363855 Рос. Федерация: МПК[7]F02D1/08, Габдрафиков Ф.З., Шамукаев С.Б., Мехоношин Е.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ». – № 2007145795/06; заявл. 10.12.2007; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 22.

2. Электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя [Текст]: пат. 2449148 Рос. Федерация: МПК[7]F02D1/08, Габдрафиков Ф.З., Шамукаев С.Б., Мехоношин Е.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ». – № 2010111991/06; заявл. 29.03.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 12.

в сборниках научных трудов и материалах конференций

1. Шамукаев С.Б. Технологические приёмы улучшения равномерности топливоподачи дизелей[Текст] / Шамукаев С.Б., Габдрафиков Ф.З., Галиуллин И.З. //Материалы Всероссийской научно-практической

конференции: «Проблемы и перспективы развития инновационной деятельности в агропромышленном комплексе». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2007. - Ч. 3. - С. 35-38

2. Шамукаев С.Б. Исследование влияния характеристики пружины форсунки на неравномерность топливоподачи дизелей [Текст]/ Шамукаев С.Б.,Габдрафиков Ф.З. и др.//Материалы Всероссийской научно-практической конференции: «Проблемы и перспективы развития инновационной деятельности в агропромышленном комплексе». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2007. - Ч. 3. - С.32-34

3. Шамукаев С.Б. Управление топливоподачей в дизелях МТА посредством электронного регулятора[Текст]/ Шамукаев С.Б. //XLVII международная научно-техническая конференция «Достижения науки - агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАУ, 2008. – С. 54-55.

4. Шамукаев С.Б. Электронное регулирование подачи топлива в дизельных двигателях на неустановившихся режимах работы [Текст]/ Шамукаев С.Б., Габдрафиков Ф.З., Абраров М.А. // Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Уфа:Башкирский ГАУ, 2009. - Ч. 1. - С. 44-46.

5. Шамукаев С.Б. Регулирование подачи топлива в дизельных двигателях на неустановившихся режимах работы [Текст] / Ф. З. Габдрафиков, С. Б. Шамукаев // Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК: материалы всерос. науч.-практ. конф. - Уфа, 2009. - Ч. 1. - С. 40-43.

6. Шамукаев С.Б. Исследование инерционности исполнительного механизма электронного регулятора на примере топливного насоса 4УТНМ [Текст] / Ф. З. Габдрафиков, С. Б. Шамукаев // Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК: материалы всерос. науч.-практ. конф. - Уфа, 2009. - Ч. 1. - С. 37-39.

7. Шамукаев С.Б. Совершенствование регулятора ТНВД дизеля при работе на установившихся и частичных режимах [Текст] / Ф. З. Габдрафиков, С. Б. Шамукаев // Научное обеспечение инновационного развития АПК : материалы Всерос. науч.-практ. конф. в рамках XX Юбилейной специализированной выставки "Агрокомплекс-2010" (2-4 марта 2010 г.). - Уфа : Башкирский ГАУ, 2010. - Ч. 3. - С. 38-41

8. Шамукаев С.Б. Повышение качества процесса дизелей позиционным воздействием топливоподачи на органы управления [Текст] / С. Б. Шамукаев // Особенности развития агропромышленного комплекса на современном этапе : материалы всерос. науч.-практ. конф. в рамках XXI Междунар. специализированной выставки "АгроКомплекс-2011", 16-17 марта 2011 г. - Уфа, 2011. - Ч. 2. - С. 97-102.

9. Шамукаев С.Б. Улучшение эксплуатационных показателей дизеля электронным управлением топливоподачи на частичных и неустановившихся режимах работы [Текст] / Ф. З. Габдрафиков, С. Б. Шамукаев // Инновационно-промышленный салон: Ремонт. Восстановление. Реновация : материалы II всерос. науч.-практ. конф., 9-11 февраля 2011 г. / Башкирский ГАУ. - Уфа, 2011. - С. 25-27.

10. Шамукаев С.Б. Совершенствование топливоподачи в дизелях машинно-тракторных агрегатов на неустановившихся режимах работы [Текст]/ Шамукаев С.Б., Габдрафиков Ф.З.//Актуальные вопросы совершенствования технологий и технического обеспечения сельскохозяйственного производства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Казанского государственного аграрного университета / Казанский ГАУ, ИМиТС. – Казань: Казанский ГАУ, 2012. – С. 68-73.

11. Шамукаев С.Б. Исследование дизеля МТА регулируемого по нагрузке [Текст]/ С.Б. Шамукаев, Ф.З. Габдрафиков//Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: материалы VII Международной научно-практической конференции в рамках XIX Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал - 2012»/ Ставропольский ГАУ. – Ставрополь: Ставропольский ГАУ, 2012. – С. 52-57.

12. Шамукаев С.Б. Улучшение динамических и технико-экономических показателей дизелей МТА при работе на неустановившихся режимах [Текст] / С. Б. Шамукаев // Роль науки в инновационном развитии АПК: материалы Всероссийской науч.- практ. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения известного ученого, профессора А. П. Иофинова (13-14 декабря 2012 г.) / Башкирский ГАУ. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2012. - С. 147-151