

А.Б. Богаевский, А.А. Прохоренко

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Выполнено теоретическое обоснование подхода к модернизации системы управления подачей топлива тепловозного дизеля, находящегося в эксплуатации с минимальными затратами и оценка возможности регулирования угла опережения впрыскивания при реализации этого подхода. Основа способа – доработка штатного механического топливного насоса высокого давления регулирующим клапаном, который управляется электромагнитом. Появляется возможность ограниченного управления моментом начала подачи топлива в зависимости от частоты вращения и нагрузки. Регулирование осуществляется в пределах прямого хода приводного кулачка распределительного вала по сигналу от датчика верхней мертвой точки. Выполнена теоретическая оценка возможного диапазона регулирования угла опережения. Предполагаемые затраты сведены к минимуму, ожидаемая экономия топлива в эксплуатации составит до 10 %.

Актуальность

Развитие транспортного дизелестроения все в большей степени определяется постоянно ужесточаемыми законодательными нормами на дымность и токсичность отработавших газов, уровень шумности работы, а также требованиями максимальной экономии топлива. Экономические и энергетические показатели дизелей, надежность, шумность работы и токсичность в свою очередь в значительной мере зависят от их топливных систем высокого давления [1]. При этом отмечается ухудшение качественных показателей дизельного топлива за счет расширения его фракционного состава и стремления фирм производителей повысить выход топлива из нефти, что создает дополнительные трудности обеспечения эффективного рабочего процесса [2].

Одним из направлений улучшения показателей транспортных дизелей является совершенствование процесса управления подачей топлива, которое должно осуществляться с учетом ряда требований, а именно:

- увеличение давления впрыскивания для повышения тонкости распыливания топлива и обеспечения оптимальной продолжительности впрыскивания;
- оптимизация характеристики впрыскивания (закона подачи топлива) в направлении обеспечения плавного начала и резкого окончания процесса, что необходимо для снижения уровня шума;
- обеспечение оптимальной цикловой подачи топлива и момента начала впрыскивания на пусковых режимах, регулирование момента начала впрыскивания в функции нагрузки и частоты вращения;
- коррекция процесса топливоподачи в зависимости от изменения внешних условий и режима работы;
- повышение точности дозирования топлива;
- обеспечение стабильности параметров топ-

ливоподачи в условиях эксплуатации [2].

Реализация мероприятий в данном направлении в значительной степени определяется возможностями совершенствования конструкции и параметров отдельных элементов дизельной топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения. Одним из таких мероприятий, продемонстрировавшим высокую эффективность и надежность в эксплуатации, является электронный регулятор типа СУДМ-01 отечественного производства, который был изготовлен серией в 100 комплектов и установлен на различные тепловозные дизели (5Д49 тепловозов 2ТЭ116 и ТЭП70, 10Д100 тепловозов 2ТЭ10, К6S310DR тепловозов ЧМЭ-3). Эффективность электронного регулятора во многом обеспечивает многофункциональное программное обеспечение с оптимальными алгоритмами, за счет использования которого повышается эффективность работы тепловозного дизеля на всех рабочих режимах эксплуатации.

В эксплуатируемых на тепловозах Украины дизелях применяются топливные системы высокого давления разделенного типа с механическим приводом плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД). В этих системах ТНВД и форсунки выполнены в виде отдельных агрегатов, соединенных трубопроводом высокого давления (ТВД). Их существенный недостаток – снижение давления впрыскивания и ухудшение качества распыливания топлива по мере уменьшения частоты вращения и нагрузки дизеля. Устранение этого недостатка – основная задача разработчиков топливных систем высокого давления транспортных дизелей [1].

Также необходимо отметить, что в рамках различных модернизаций реально не было предложено ни одного мероприятия по устранению такого существенного конструктивного недостатка эксплуатируемых в настоящее время тепловозных дизелей, как отсутствие автоматического регулирова-

ния момента начала впрыскивания на пусковых режимах и регулирование момента начала впрыскивания в функции нагрузки и частоты вращения. Хотя общеизвестно, что эффективные показатели работы дизеля существенно зависят от этого регулировочного параметра. Упомянутый ранее электронный регулятор СУДМ-01 и аналогичные ему зарубежные изделия при своей работе воздействуют на ТНВД через штатную управляющую рейку и, следовательно, не решают проблему регулирования угла опережения впрыскивания. Подавляющее же число тепловозных дизелей в промышленном и железнодорожном транспорте имеют фиксированный угол опережения впрыскивания, который выбирается опытным путем из условия обеспечения номинальной (максимальной) мощности. Если же учесть, что в процессе эксплуатации дизель тепловоза работает на максимальных нагрузках не более 5% времени (а остальное время – на частичных режимах или на холостом ходу, но при угле опережения впрыскивания, выбранном для номинального режима), то становится очевидным, что основное время эксплуатации дизель тепловоза работает не в оптимальных условиях. Таким образом, введение возможности регулирования момента начала впрыскивания (пусть даже в ограниченном диапазоне) позволит ощутимо повысить экономичность дизеля тепловоза в эксплуатации, что с учетом достаточно высоких цен на дизельное топливо **является актуальной задачей.**

Целью настоящей работы является обоснование концепции модернизации системы управления подачей топлива форсированного транспортно-дизеля для обеспечения возможности регулирования угла опережения впрыскивания.

Основная часть работы

Исходной предпосылкой к работе является известный факт – каждый отдельный режим работы двигателя имеет свой оптимальный угол опережения впрыскивания топлива, обеспечивающий получение минимума удельного эффективного расхода топлива g_{emin} . Однако выбор угла опережения впрыскивания определяется и другими условиями.

Так, например, изменение угла опережения впрыскивания отражается не только на эффективной мощности N_e и удельном эффективном расходе топлива g_e , но и на значении максимального давления сгорания p_z , максимальной скорости нарастания давления в цилиндре $dp/d\phi$ (т. е. жесткости работы) и целого ряда других ограничивающих факторов. Таким образом, значения угла опережения впрыскивания подбирают экспериментально, с учетом всех перечисленных (и возможных других: тип камеры сгорания, сорт топлива и др.) кон-

структивных особенностей и ограничений.

Исходя из этого, в общем случае алгоритм выбора требуемого (оптимального) для данного режима угла опережения впрыскивания должен быть построен следующим образом. При снижении нагрузки, то есть уменьшении цикловой подачи топлива, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания увеличивается, условия смесеобразования и сгорания улучшаются, в связи с чем оптимальный угол опережения впрыскивания уменьшается. При увеличении угловой скорости коленчатого вала увеличивается интенсивность вихревого движения воздуха в камере сгорания, повышается скорость смесеобразования, что снижает время задержки воспламенения. Однако при увеличении частоты вращения время от начала впрыскивания до ВМТ уменьшается быстрее, чем снижается время задержки воспламенения. В связи с этим угол опережения впрыскивания по мере увеличения угловой скорости вращения коленчатого вала целесообразно увеличивать [5].

Для компенсации запаздывания впрыскивания и воспламенения топлива рядные топливные насосы дизелей малой и средней мощности снабжаются автоматическими муфтами опережения начала впрыскивания центробежного типа, которые обеспечивают изменение опережения кулачкового вала насоса относительно коленчатого вала дизеля в пределах $10\div 20^\circ$ п.к.в. при повышении частоты вращения [6]. Находят свое применение и гидравлические механизмы опережения, встроенные в корпус насоса и изменяющие угол опережения начала впрыскивания в зависимости от давления топлива, создаваемого топливopодкачивающим насосом, т.е. в функции скоростного режима [6]. Однако, подобные системы для находящихся в эксплуатации серийных тепловозных дизелей с традиционной системой топливоподачи, использующей индивидуальные ТНВД для каждого цилиндра, конструктивно не предусмотрены, а введение механизма опережения впрыскивания, по принципу действия напоминающего муфту центробежного типа, будет равносильно созданию новой конструкции дизеля. Такой подход к модернизации топливных систем эксплуатирующихся железнодорожных дизелей потребует, в соответствии с нормативными документами [7], значительных временных затрат на проведение полного цикла опытно-конструкторских работ и последующих многочисленных стендовых и эксплуатационных испытаний для подтверждения ожидаемых в эксплуатации экономических показателей по снижению расхода топлива, повышению надежности и экологичности. В эти временные затраты необходимо вклю-

читать также переработку методик технического обслуживания дизеля в эксплуатации с учетом модернизированной системы подачи топлива.

В то же время перспективным для модернизации управления подачей топлива тепловозных дизелей представляется использование идеи построения топливной аппаратуры по системе, получившей название PPN (насос-трубопровод-форсунка от англ. pump-pipe-nozzle)[3]. Система PPN разрабатывалась с целью увеличения давлений впрыскивания для повышения тонкости распыливания. У различных производителей встречаются различные названия такого принципа построения ТНВД. Так у известного крупносерийного изготовителя фирмы «Bosh» такая схема получила название UPS (от англ. Unit ramp system) [6]. Предполагается, что дизель с этой системой имеет отдельное устройство по регулированию угла опережения впрыскивания топлива.

По сравнению с общепринятой системой подачи топлива, использующей индивидуальные насосы, управление дозированием топлива через рейку и винтовую отсечную кромку было заменено клапаном, управляемым электромагнитом, который практически может определять начало и конец цикловой подачи [3, 6]. Управляемый электромаг-

нитом клапан, конструктивно расположен между форсункой и ТНВД. Плунжер насоса имеет форму правильного цилиндра без привода от рейки. Положение отсечных кромок плунжера относительно наполнительных и отсечных отверстий втулки плунжера не регулируется. Параметром включения электромагнита клапана является давление топлива, которое определяется кулачковым валом. Включение электромагнита клапана осуществляется через время, которое вычисляется по специальному алгоритму в ЭБУ системы автоматического регулирования частоты вращения. Таким образом происходит изменение цикловой подачи и регулирование частоты вращения дизеля.

После достижения необходимого давления топлива в надплунжерной полости на управляющий электромагнит подается импульс тока, в результате чего он открывает клапан и топливо из пространства над плунжером подается на форсунку через ТВД. При отсутствии тока в электромагните клапан перекрывает путь топливу к форсунке, определяя, таким образом, количество подаваемого топлива. Предъявляются требования к форме приводящих насосы кулачков.

Принцип работы такой системы иллюстрируется рис. 1.

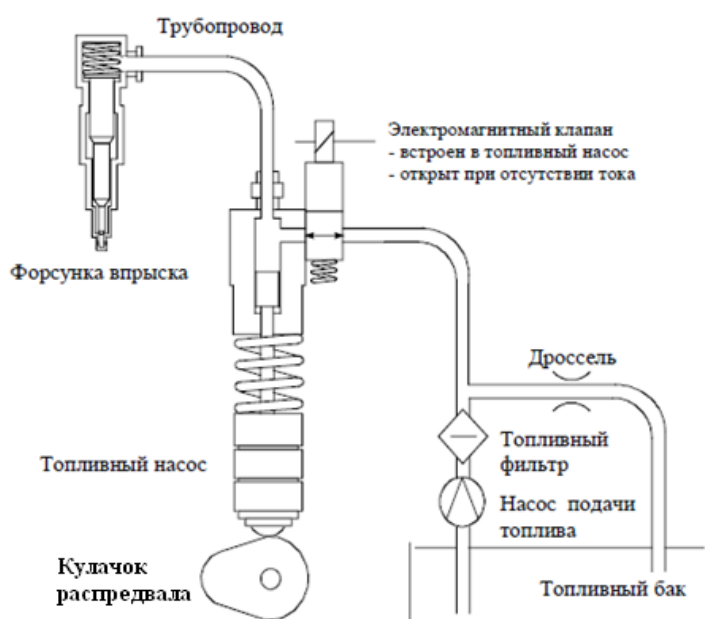


Рис. 1. Принцип работы системы PPN

Модернизация такой системой мощных Модернизация такой системой тепловозных дизелей в условиях эксплуатации требует создавать принципиально новые ТНВД, новый приводной кулачковый вал и, соответственно, проводить длительные опытно – конструкторские работы и многочисленные испытания (о чем упоминалось выше) [7].

В то же время необходимо отметить, что система типа PPN–UPS допускает ограниченное регулирование момента начала впрыскивания топлива в пределах прямого хода приводного кулачка распределительного вала. Распределительный вал механически связан с коленчатым валом дизеля, а значит, каждый приводной кулачок ТНВД имеет

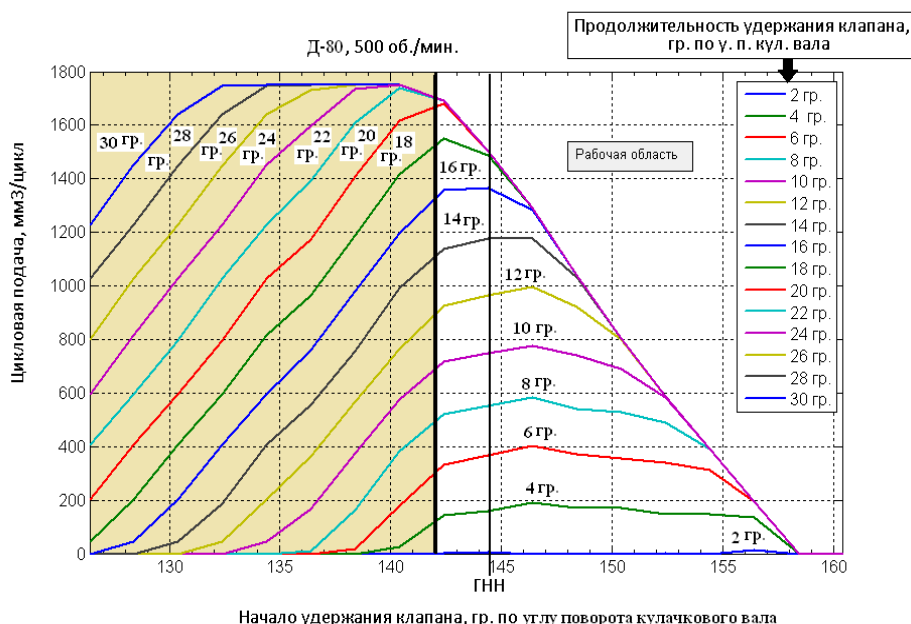
фиксированный геометрический угол по отношению к ВМТ соответствующего цилиндра. В случае использования для модернизации идеи работы системы типа PPN, данный угол может с помощью электрического управления клапаном уменьшаться в зависимости от частоты вращения и величины нагрузки. Для электрического управления необходимо установить на модернизируемом дизеле датчик ВМТ. Регулирование момента начала впрыска в пределах прямого хода приводного кулачка необходимо производить по сигналу с датчика ВМТ.

Модернизировать в этом случае необходимо лишь верхнюю часть корпуса ТНВД, в которую встраивается клапан, управляемый электромагнитом. Конструкция форсунки, плунжера, ТВД остаются без изменений, что немаловажно при серийном внедрении предлагаемого мероприятия. Для обеспечения максимального диапазона регулирования подачи топлива и момента начала впрыскивания необходимо управляющую рейку установить в положение максимальной подачи топлива. При таком техническом решении модернизация будет представлять комплекс работ по улучшению технико-экономических характеристик дизеля, находящегося в эксплуатации, путем замены штатных ТНВД на усовершенствованные и этот процесс можно совместить с плановым капитальным ремонтом.

Для оценки возможности регулирования угла опережения в предлагаемой конструкции было произведено моделирование процессов впрыска

ТНВД дизелей типа Д70(80) для частоты вращения приводного вала 500 мин^{-1} , результаты которого приведены на рис. 2. Расчеты выполнены с помощью подробной математической модели топливной аппаратуры указанного дизеля, разработанной на кафедре ДВС НТУ «ХПИ» и описанной в [8]. Расчет выполнен через 2 гр. по углу поворота кулачкового вала для режима 500 мин^{-1} ТНВД. При заложенных в модель физических параметрах клапана и электромагнита продолжительность движения клапана составила примерно 2,4 гр. поворота кулачкового вала.

Как видно из рис. 2, имеет место существование так называемой *нерабочей области*, где угол начала нагнетания топлива не зависит от момента начала удержания управляющего клапана и всегда равен углу ГНН – моменту, когда закрывается наполнительное отверстие. В *рабочей области* наличие правой (наклонной) границы обусловлено открытием регулировочной кромкой плунжера отсечного отверстия. Таким образом, показана принципиальная возможность изменения угла опережения впрыскивания топлива путем изменения момента начала удержания клапана в пределах от 2...14 гр. поворота кулачкового вала в зависимости от нагрузки. Существование этих пределов объясняется наличием наполнительного и отсечного отверстий во втулке плунжера. Можно уверенно предположить, что и на частичных скоростных режимах полученная качественная картина зависимости не изменится.



ГНН – геометрическое начало нагнетания, обусловленное перекрытием плунжером наполнительного отверстия (герметизацией надплунжерной полости)

Рис.2. Результаты моделирования возможности регулирования угла опережения впрыскивания топлива

Экспериментальные данные по испытаниям насосов дизелей Д70(80), проведенные в лаборатории топливной аппаратуры ГП «Завод им. В.А. Малышева», подтвердили адекватность расчетов по предложенной математической модели, а, соответственно, и достоверность использования результатов моделирования для решаемой в статье задаче. Так, испытания экспериментального образца усовершенствованной системы с доработанным механическим ТНВД и микроконтроллерным управлением для одноцилиндровой секции тепловозного дизель-генератора продемонстрировали способность системы регулировать момент начала подачи топлива в функции нагрузки и частоты вращения в пределах прямого хода приводного кулачка. Диапазон регулирования электрическим способом составил до 10 гр. в сторону уменьшения от максимального фиксированного угла для номинального режима работы.

Следует заметить, что разработанные конструктивные элементы для доработки корпусных деталей ТНВД и управляющего электромагнита, позволяют выполнять все работы на мощностях украинских предприятий (в частности харьковских), что существенно повлияет на итоговую цену системы в случае ее внедрения в эксплуатацию. Модернизацию дизеля предлагаемой системой можно будет выполнить в период текущего планового ремонта, т.е. не выводя дизель (а соответственно, и транспортное средство) из эксплуатации. По предварительным оценкам экономическая эффективность составит до 10 % с учетом условий эксплуатации и реализации регулирования угла опережения в дизелях других назначений. Для сравнения – экономическая эффективность от внедрения электронного регулятора составляет 5...6 % [4].

Выводы

Предложенная концепция модернизации системы управления подачей топлива форсированного транспортного дизеля для обеспечения возможности регулирования угла опережения впрыскивания топлива показала свою работоспособность. Используя клапанное электромагнитное управление цикловой подачей, можно с помощью специального алгоритма регулировать момент начала подачи в зависимости от нагрузки и частоты вращения дизеля в пределах 2...14 гр. поворота кулачкового вала.

Список литературы:

1. Казачков Р.В. Проектирование топливных систем высокого давления: учебное пособие.- Харьков: ХГПУ,

1994.- 308 с. 2. Горбаченко В.К. Электронные системы управления подачей топлива в дизелях: обзорная информация./ В.К. Горбаченко, В.В. Курманов, М.В. Мазинг - М.: ЦНИИТЭИавтопром, 1989. – 52 с. 3. Система управления для систем электронно-управляемой подачи топлива PPN – PNU – CR. Версия MVC 01 – 10/20: руководство MV 99 002-rus / 04-03. - HEINZMANN GmbH, Schönau (Schwarzwald) Germany, 2003. – 55 с. 4. Богаевский А.Б. Оценка возможности снижения расхода топлива дизель – генератора маневрового тепловоза за счет совершенствования управления/ А.Б. Богаевский, А.Н. Борисенко, М.С. Войтенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. - № 1. – С. 105 - 109. 5. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. – М.: Машиностроение, 1978. – 472 с. 6. Системы управления дизельными двигателями. Пер. с нем. – М.: «КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с. 7. DSTU ГОСТ 15.001:2009. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно - технического назначения. Издательство «Стандарты», Москва, 1988 г. – 8 с. 8. Прохоренко А.О. Научные принципы разработки систем управления дизелей с электрогидравлической топливной аппаратурой: Дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 /Прохоренко Андрій Олексійович; НТУ „ХПІ”. – Харків, 2013. –317с.

Bibliography (transliterated):

1. Kazachkov, R.V. (1994), *Designing of high-pressure fuel systems: a teaching aid aid* [Proyektirovaniye toplivnykh sistem vysokogo davleniya: uchebnoye posobiye], KhGPU, Kharkov, 308 p. 2. Gorbachenko, V.K., Kurmanov, V.V., Mazing, M.V. (1989), *Electronic control systems for fuel supply in diesel engines: overview information* [Elektronnyye sistemy upravleniya podachey topliva v dizelyakh: obzornaya informatsiya], TSNIITEIavtoprom, Moscow, 52 p. 3. (2003), *Control system for electronically controlled fuel supply systems PPN-PNU-CR. Version MVC 01 - 10/20: manual MV 99 002-eng / 04-03* [Sistema upravleniya dlya sis-tem elektronno-upravlyayemoy podachi topliva PPN – PNU – CR. Versiya MVC 01 – 10/20: rukovodstvo MV 99 002-rus / 04-03].- HEINZMANN GmbH, Schönau (Schwarzwald) Germany, 55 p. 4. Bogayevsky, A.B., Borisenko, A.N., Voitenko, M.S. (2013), *Estimation of the possibility of reducing the fuel consumption of the diesel generator of the shunting locomotive by improving the management* [Otsenka vozmozhnosti snizheniya raskhoda topliva dizel' – generatora manevrovogo teplovoza za schet sovershenstvovaniya upravleniya], *Internal combustion Engines, Kharkiv, NTU "KhPI"*, No 1, pp. 105-109. 5. Krutov, V.I. (1978), *Internal combustion engine as an adjustable object* [Dvigatel' vnutrennego sgoraniya kak reguliruyemyy ob'ekt], *Mechanical Engineering, Moscow*, 472 p. 6. (2004), *Control systems for diesel engines. Trans. from ger. [Sistemy upravleniya dizel'nyimi dvigatelyami. Per. s nem.]*, "KZHI" Behind the wheel", 2004, 480 p. 7. DSTU GOST 15.001:2009. *System of development and production for production. Products of industrial and technical designation* [Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktsiya proizvodstvenno - tekhnicheskogo naznacheniya]. Publishing house "Standards", Moscow, 1988 - 8 p. 8. Prokhorenko, A.O. (2013), *Scientific principles of development of control systems of diesel engines with electrohydraulic fuel equipment: Dis. Doct. Tech. Sciences: 05.05.03* [Nauchnyye printsipy razrabotki sistem upravleniya dizel'ey s elektrogidravlicheskoj toplivnoy apparaturou: Dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.03], Kharkiv, NTU "KhPI", 317 p.

Поступила в редакцию 26.06.2017г.

Богаевский Александр Борисович – доктор техн. наук, проф., профессор кафедры автомобильной электроники Харьковского Национального Автомобильно-Дорожного Университета, Харьков, Украина, e-mail: bogayevski.a@gmail.com.

Прохоренко Андрей Алексеевич – доктор техн. наук, проф., проф. кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального Технического Университета „Харьковский Политехнический Институт”, Харьков, Украина, e-mail: ap.kharkiv@ukr.net.

**УПРАВЛІННЯ КУТОМ ВИПЕРЕДЖЕННЯ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА ТЕПЛОВИЗНОГО
ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА**

О.Б. Богасєвський, А.О. Прохоренко

Виконано теоретичне обґрунтування підходу до модернізації системи управління подачею палива потужного транспортного дизель – генератора в умовах експлуатації з мінімальними витратами і здійснена оцінка можливості регулювання кута випередження подачі палива при реалізації цього підходу. Основа способу – доопрацювання штатного механічного паливного насоса високого тиску регулюючим клапаном, який управляється електромагнітом. З'являється можливість обмеженого управління моментом початку подачі палива в залежності від частоти обертання і навантаження. Регулювання здійснюється в межах прямого ходу приводного кулачка розподільного валу за сигналом від датчика верхньої мертвої точки. Виконана теоретична оцінка можливого діапазону регулювання кута випередження. Витрати на впровадження зведені до мінімуму, очікувана економія палива в експлуатації складе до 10 %.

OPERATING ANGLE OF FUEL INJECTION OF LOCOMOTIVE TRANSPORT DIESEL GENERATOR

A.B. Bogayevsky, A.O. Prokhorenko

The theoretical substantiation of the approach to the modernization of the fuel supply control system of a locomotive transport diesel, which is in operation with minimal costs and an estimation of the possibility of adjusting the injection advance angle is realized while the implementation of this approach. The basis of the method is the completion of a regular high-pressure mechanical fuel pump with a control valve, which is controlled by an electromagnet. There is the possibility of limited control of the timing of the start of fuel delivery, depending on the speed and load. The adjustment is carried out within the forward travel of the cam of the camshaft by the signal from the top dead center sensor. A theoretical estimate of the possible range of advance angle control has been performed. The expected costs are minimized, the expected fuel economy in operation will be up to 10%.