

ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ГАЗОВЫХ ФОРСУНОК В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Тихомиров А.Н.¹, Уткин Ю.С.¹, Щербаков В.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород, Россия, e-mail:alniti@mail.ru

Сегодня приходится признать, что дизельный двигатель, приводящий в движение значительную часть легкового автопарка и практически весь коммерческий транспорт, стал плохо соответствовать экологическим потребностям. Переводу на питание газообразным топливом целью их экологического оздоровления чаще подвергали бензиновые двигатели. В плане газификации дизельных двигателей существует два подхода. Первый, переделка его в искровой мотор, работающий на газе. Второй подход – газодизели. Среди исполнительных элементов газоподающих систем, как искровых, так и газодизельных, все чаще встречается электромагнитная газовая форсунка. От эффективной работы этого элемента в значительной степени зависит стабильная и надежная работа двигателя на газообразном топливе. Приведены некоторые результаты экспериментальной оценки эффективности использования электромагнитных газовых форсунок в дизельных двигателях.

Ключевые слова: электромагнитная форсунка, линейность расходной характеристики, время срабатывания.

FEATURES OF USING ELECTROMAGNETIC GAS INJECTORS IN DIESEL ENGINES

Tikhomirov A.N., Utkin Y.S., Scherbakov V.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail:alniti@mail.ru

Today, we must acknowledge that the diesel engine driving a significant part of the fleet cars and nearly all commercial vehicles became ill meet environmental needs. Feeding with gaseous fuels for the purpose of ecological rehabilitation often subjected to gasoline engines. In terms of diesel engines, there are two approaches. First, recast it in a spark engine that runs on gas. The second – dual fuel engine. Among the actuators of gas supply systems both spark and dual fuel electromagnetic gas injector are very common. Reliable operation of the engine on gaseous fuel are largely dependent on efficient operation of this element. Some results of experimental evaluation of the effectiveness of the use of electromagnetic gas injectors in diesel engines are presented.

Key words: electromagnetic injector, linearity of the flow characteristics, response time.

Перевод транспорта на газовое топливо рассматривается всеми государствами мира с двумя основными целями. Первая – снижение энергозависимости от иных государств [3]. Вторая цель – создание условий для снижения выбросов в атмосферу загрязняющих веществ.

Для нашей страны первая цель неактуальна, поскольку, по словам министра энергетики А.В. Новака, мы не имеем дефицита моторного топлива, и в ближайшей перспективе мы также не будем этого дефицита иметь. Остается экологическая составляющая. Здесь следует оговорить, что ожидать снижения токсичности при переводе автотранспорта на природный газ в разы совершенно необоснованно. Но добиться даже заявленного министром снижения в 12% можно только при использовании современных средств дозирования и подачи газового топлива в ДВС.

Сегодня приходится признать, что дизельный двигатель, приводящий в движение значительную часть легкового автопарка и практически весь коммерческий транспорт, стал плохо соответствовать экологическим потребностям. Еще более жесткое определение дано в докладе Датской исследовательской организации TNO – дизельные двигатели «...не смогут

приблизиться к двигателям, работающим на других топливах, несмотря ни на какие темпы развития технологий» [4]. Работы по экологическому оздоровлению следует направить на дизельный автотранспорт.

В плане газификации дизельных двигателей существует два подхода. Первый, переделка его в искровой мотор, работающий на газе [5]. Главное преимущество – отработанная технология снижения выбросов (трехкомпонентный нейтрализатор). Второй подход – газодизели –двигатели, работающие одновременно на двух топливах, и легко переключающиеся на использование чистого ДТ. Второй подход более привлекателен в переходный период, пока количество заправочных станций невелико.

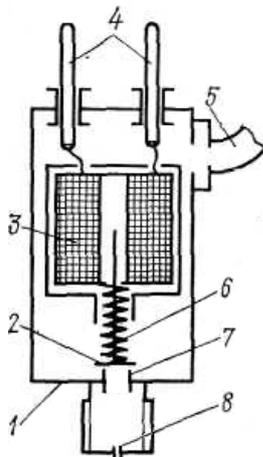


Рисунок 1. Схема ЭМФ

- 1 – корпус
- 2 – клапан
- 3 – электромагнит
- 4 – контакты
- 5 – вход газа
- 6 – пружина
- 7 – седло клапана
- 8 – дозирующий жиклер

Среди исполнительных элементов газоподающих систем, как искровых, так и газодизельных, все чаще встречается электромагнитная газовая форсунка (ЭМФ). От эффективной работы этого элемента в значительной степени зависит в целом стабильная и надежная работа двигателя на газообразном топливе. Форсунка представляет собой быстродействующий гидравлический клапан с приводом от электромагнита. Большинство электромагнитных газовых форсунок имеют конструктивную схему, показанную на рис. 1. В общем корпусе (1) размещены клапан (2) и электромагнит (3). В обесточенном состоянии электромагнита клапан прижат пружиной (6) к седлу клапана (7). Концы обмотки электромагнита выведены наружу через изолированные от корпуса электрические контакты (4). Газ подводится к корпусу через штуцер (5) при индивидуальном исполнении, или через боковой вход при компоновке на рампе.

Управление цикловой подачей производится путем изменения времени открытого состояния клапана. В идеальном, с точки зрения регулирования, случае время открытого состояния клапана равно продолжительности электрического управляющего импульса. Линейность расходной характеристики при этом совершенно естественна. Однако в реальной форсунке клапан открывается и закрывается не одновременно с фронтами управляющего импульса, а с запаздыванием. Это обусловлено тем, что магнитный поток в магнитопроводе форсунки достигает своего максимального значения не мгновенно, а через промежуток времени, практически равный величине $(4...5) L/r$, где L – индуктивность обмотки электромагнита, а r – ее активное сопротивление.

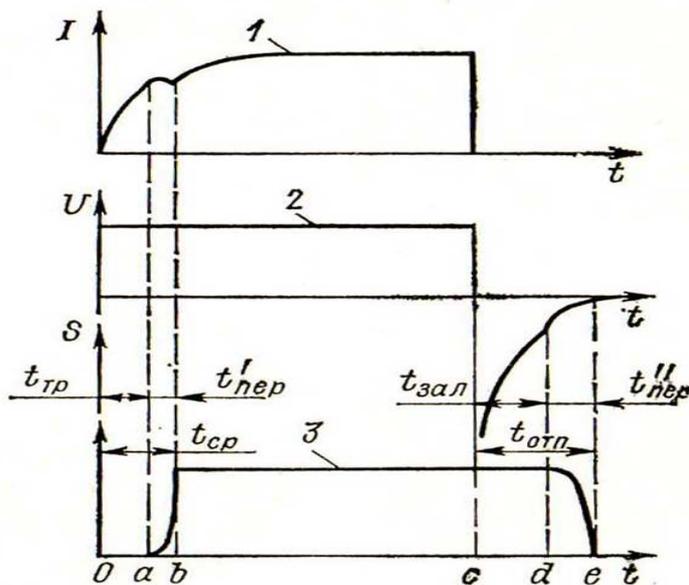


Рисунок 2. Переходные процессы в ЭМФ

1 – осциллограмма тока, 2 – осциллограмма напряжения, 3 – перемещение якоря, a и b – начало и конец движения якоря, c – конец импульса тока, d и e – начало и конец обратного движения якоря, $0a$ и ab – время срабатывания перелета якоря, $0b$ – время срабатывания якоря $t_{ср}$, $0c$ – продолжительность управляющего импульса, cd и de – время "залипания" $t_{зал}$ и обратного перелета якоря $t_{пер}''$, ce – время отпущения якоря $t_{отп}$.

исчезает также не сразу. Через промежуток времени, который обычно называют временем "залипания" $t_{зал}$ якоря, усилие падает до значения отпущения и клапан закрывается. Время "залипания" и время обратного перелета $t_{пер}''$ якоря в сумме составляют время отпущения $t_{отп}$ клапана [2].

Значительное влияние на эти параметры оказывают конструкция и материал магнитопровода, масса подвижных деталей, наличие трения при перемещении этих деталей, противодействующие усилия, а также соотношение между активным и индуктивным сопротивлением обмотки форсунки. Центральная задача, стоящая перед разработчиками ЭМФ, – максимально возможное снижение времени переходных процессов в них.

Это привело к массовому применению для них различных способов форсирования. Как правило, обмотка газовой форсунки имеет низкое активное сопротивление (1...3 Ом). Первоначально на нее подается полное напряжение питания, а по истечении времени форсирования напряжение снижают до удерживающего. Пиковый ток форсирования обычно 2,0... 6,0 А, ток удержания: 0,35...1,0 А. Удержание все чаще организуется за счет широтно-импульсной модуляции ШИМ [1].

Здесь возможно несколько вариантов развития событий. Если процесс открытия или закрытия клапана имеет высокую повторяемость от цикла к циклу, то погрешности в дозировании газа на этих этапах однозначно дополняют друг друга. В сумме наблюдается

С нарастанием магнитного потока увеличивается сила, с которой якорь клапана притягивается к сердечнику магнитопровода. По прошествии некоторого времени усилие достигает величины достаточной для срабатывания с места якоря и клапан открывается. Таким образом, время срабатывания $t_{ср}$ состоит из времени до начала срабатывания $t_{тр}$ и времени перелета $t_{пер}^I$ якоря. После окончания управляющего импульса магнитный поток

либо недобор цикловой подачи (относительно ожидаемой) в случае превышения времени срабатывания над временем отпускания, либо перебор – в случае превышения времени отпускания. На рисунке 3 схематично представлены две возможные расходные характеристики с упомянутыми выше особенностями. Очевидно, что характеристика 1 с затянутыми фазами отпускания будет обеспечивать меньшую кратность цикловых подач $K=q_{max}^1/q_{min}^1$ чем характеристика 2 с затянутыми фазами срабатывания.

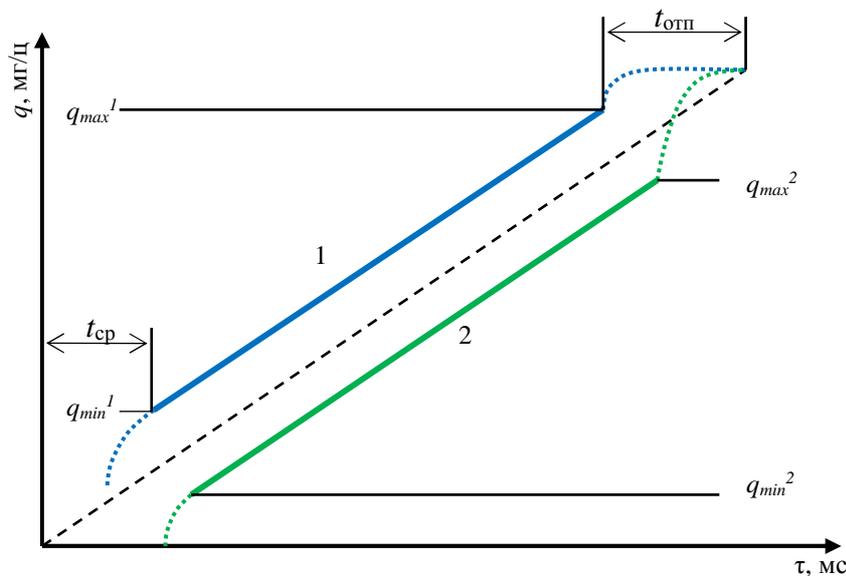


Рисунок 3. Схема расходных характеристик форсунок при разном их исполнении.

Диапазон построения расходной характеристики ЭМФ определяется периодом следования импульсов, задаваемым исследователем. В начале и конце каждой из расходных характеристик наблюдается искажение линейности. При малых длительностях импульсов снижение подачи обусловлено неполным перелетом и, соответственно, открытием клапана. При импульсах короче, чем $t_{ср}$, расход через форсунку неуправляем, и считается, что минимальная длительность управляющих импульсов лимитирована именно временем срабатывания.

При длительностях управляющих импульсов близких к периоду их следования клапан форсунки не успевает выполнить обратный перелет и сесть на седло. Форсунка перестает полностью закрываться, расход через нее становится постоянным и максимальным. Расход через форсунку также становится неуправляем, но только в пределах некоторого диапазона длительностей, определяемого временем отпускания.

Линейный диапазон характеристики, таким образом, определяется в зоне минимальных длительностей временем срабатывания форсунки, а в зоне максимальных – периодом следования импульсов с учетом неуправляемого диапазона длительностей.

В лаборатории ДВС НГТУ им. Р.Е.Алексеева была собрана установка, позволяющая проводить полный комплекс электрических и гидравлических испытаний газовых ЭМФ.

Продувка осуществлялась воздухом при избыточном давлении 100 кПа. Некоторые результаты представлены на рисунках 4...6.

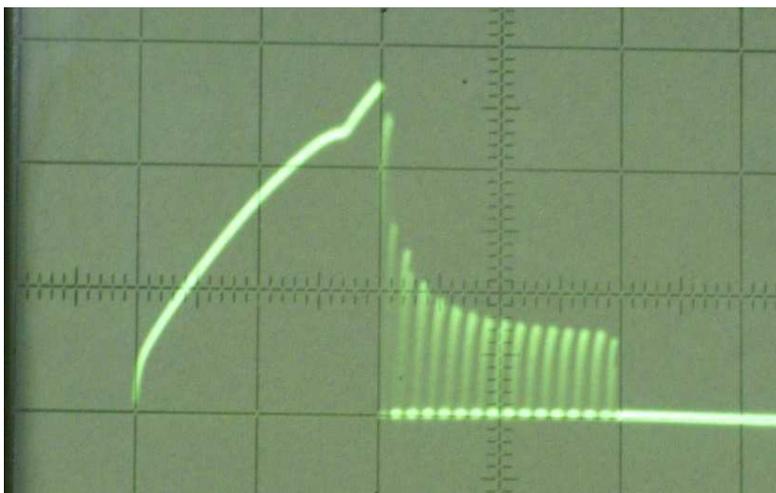


Рисунок 4. Осциллограмма тока через форсунку. Развертка 2 мс/дел. Форсировка 4 мс, удержание ШИМ 4 мс. Время срабатывания 3,6мс.

перемещениях якоря, зачастую неразличим (см. рис. 5).

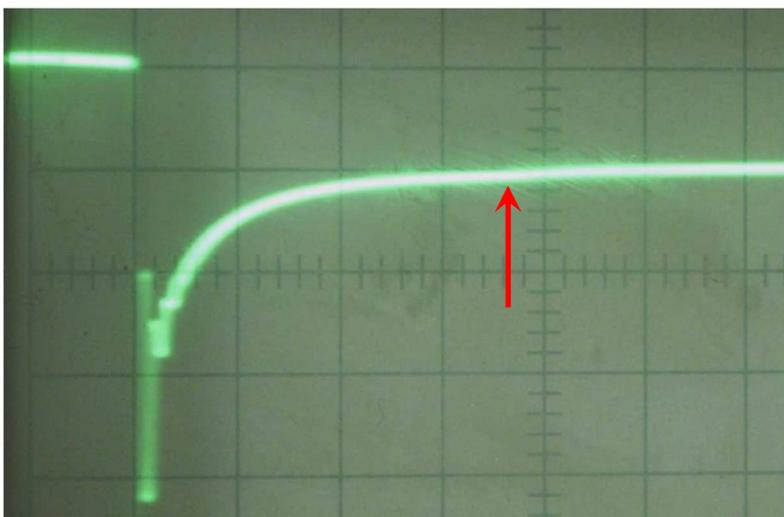


Рисунок 5. Осциллограмма напряжения на форсунке. Развертка 1 мс/дел. Время отпущения 3,6мс.

Сказанное нарушается при длительностях близких к длительности форсирования. Для испытываемой форсунки время срабатывания $t_{cp} = 3,6$ мс (рис. 4), и длительность форсирования была установлена 4 мс. На реальной расходной характеристике (рис. 6) именно при $\tau = 4$ мс наблюдается характерный всплеск цикловой подачи, значительно отклоняющий характеристику от линейной. Объясняется он ростом тока обрыва при окончании управляющего импульса и затягиванием времени отпущения. Результатом становится увеличение зоны нелинейности в начале характеристики до $\tau \sim 5$ мс.

Что касается отпущения, то по расходной характеристике неуправляемый диапазон длительностей всего 1,6 мс (от 11,7 до 13,3 мс), хотя на осциллограммах напряжения (рис. 5) время отпущения определяется равным 3,6 мс. Объяснение кроется в наложении процессов

Время срабатывания традиционно оценивается по осциллограммам тока через обмотку электромагнита (рис. 4). Время отпущения клапана определяется не так однозначно, поскольку на осциллограммах напряжений характерный изгиб линий, связанный с изменением индуктивности при

Форсирование по току дополнительно сокращает и время отпущения форсунки. Поскольку удержание якоря производится меньшим током, то и обрыв импульса генерирует меньшую ЭДС самоиндукции. Так при снижении тока удержания с 4 А до 1 А время обратного перелета сокращается с 4 мс до 3 мс.

отпускания и последующего срабатывания. Если обратный перелет клапана $t_{пер}^{II}$ успевает произойти за время срабатывания $t_{тр}$, искажения гидравлических свойств не происходит.

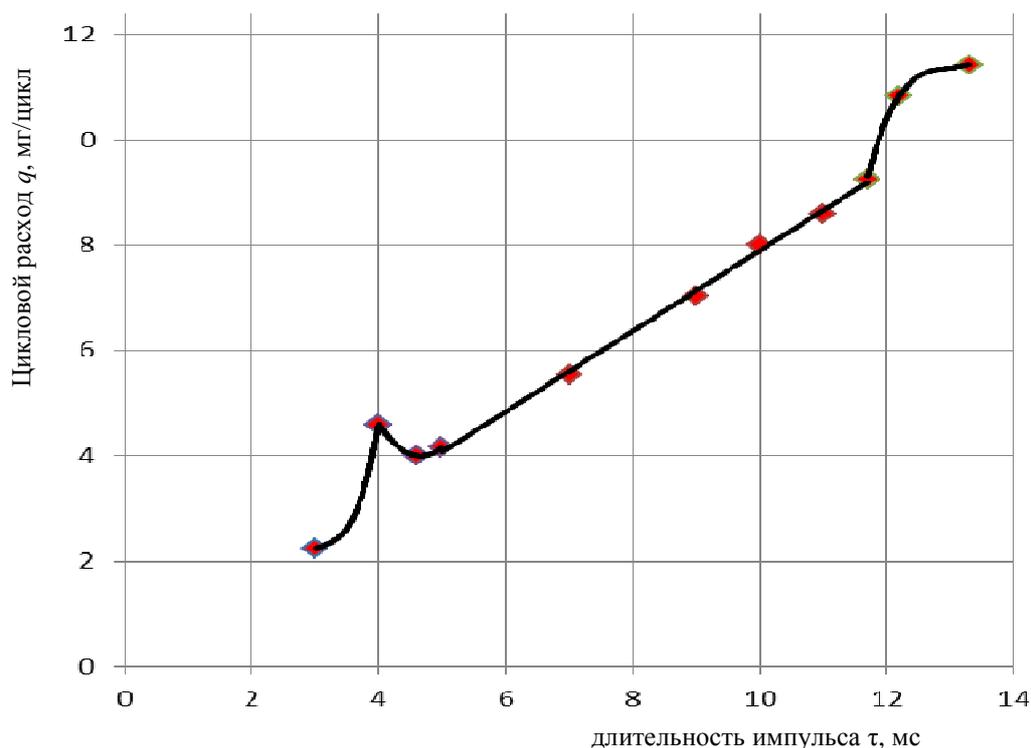


Рисунок 6. Расходная характеристика типичной газовой ЭМФ. Период следования импульсов 13,3 мс, длительность форсирующего импульса 4 мс, давление воздуха 100 кПа, дозирующий жиклер $\phi=1,5$ мм.

При установке индивидуальных форсунок на каждый цилиндр (системы с распределенным впрыском) период следования импульсов определяется временем рабочего цикла $DVCT=30\delta/n$, где n – частота вращения вала двигателя, мин^{-1} , δ – тактность двигателя (4 или 2).

Номинальная частота вращения современных автомобильных искровых двигателей может превышать 6000 мин^{-1} , и тенденция к росту "оборотности" сохраняется. Поэтому на сегодняшний день "лимит" по максимальной длительности управляющего импульса можно считать равным 15...20 мс. При этом кратность цикловых расходов топлива для атмосферных двигателей 4,5...5. Для представленных выше форсунок в диапазоне длительностей импульса от 5 до 18 мс (при $n=6000 \text{ мин}^{-1}$ вычитаем время неуправляемого диапазона длительностей 2 мс) кратность расходов 3,38. Другими словами – допустимая частота вращения без потери производительности не более 4800 мин^{-1} .

Для дизелей частоты вращения ниже, но кратность в случае наддува может оказаться больше и достигать величин 8...12. Подобную кратность при использовании газовых ЭМФ удастся реализовать только для относительно тихоходных конвертированных дизелей с частотой вращения не более 2500 мин^{-1} .

Применительно к газодизелю максимальные цикловые подачи газа по отношению к «чистому» дизелю снижаются. Это обусловлено не только наличием обязательной запальной дозы дизельного топлива, но и необходимостью некоторого повышения этой запальной дозы в зоне полных нагрузок для охлаждения распылителей форсунок дизельным топливом. Дополнительные ограничения могут возникать из-за вероятности возникновения детонации в газозоудшной смеси при обогащении этой смеси на полных нагрузках до $\alpha = 1,5 \dots 2,0$.

Минимальную цикловую подачу в газодизельном цикле следует устанавливать на уровне, гарантирующем состав смеси до $\alpha = 3 \dots 3,5$. В противном случае при горении столь бедных однородных смесей будет наблюдаться большое количество несгоревших углеводородов в отработавших газах. И то и другое ограничение снижает степень замещения дизельного топлива, но необходимо для роста надежности всей системы и снижения токсичности. С точки зрения форсунок подобный подход снижает кратность цикловых подач до величин не выше 3,5, что может быть реализовано с учетом их специфических особенностей в любом диапазоне частот вращения характерном для дизельных двигателей.

Список литературы

1. Покровский Г. П. Электроника в системах подачи топлива автомобильных двигателей. – М.: Машиностроение, 1990, 175 с.
2. Электронное управление автомобильными двигателями / Г.П. Покровский, Е.А. Белов, С.Г. Драгомиров и др.: Под ред. Покровского. – М.: Машиностроение, 1994. – 336 с.:
3. International Energy Outlook 2011. – U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, September 2011. – P.123.
4. P. Hendriksen et al [5] Evaluation of the environmental impact of modern passenger cars on petrol, diesel, automotive LPG and CNG, TNO report 03.OR.VM.055.1/PHE, 2003.
5. Christian Bach, Gaseous fuels for motor vehicles // WUT-NIMS-Empa Workshop (2010-09).

Рецензенты:

Беляков В.В., д.т.н., профессор кафедры «Автомобили и тракторы» ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород;

Молев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород.