

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.436.038.001

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЕГО РАБОЧЕГО ОБЪЕМА

**Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко,
И.А. Петруня, Т.С. Аношина**

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Макля, 6, Москва, Россия, 117198

В статье приведено описание разработанной в РУДН системы отключения цилиндров или циклов дизеля. Система применима для регулирования дизеля изменением его рабочего объема.

Ключевые слова: дизель, экономичность, регулирование, отключение цилиндров, изменение рабочего объема двигателя.

В условиях эксплуатации современные дизели транспортных средств, тракторов и других мобильных машин длительное время работают на режимах малых нагрузок (МН) и холостых ходов (ХХ). Под малыми нагрузками обычно понимают нагрузки, не превышающие 40% от полной. Такие же режимы характерны также для дизель-генераторов, обеспечивающих электроэнергией, например, промышленные объекты, на которых основными являются режимы полной нагрузки, обеспечивающие производственные процессы, а в ночные периоды при отсутствии производственного процесса — отсутствие нагрузки или ее минимизацию. Для судовых дизелей речного флота характерным является понижение нагрузки при движении по течению реки с возрастанием ее до полной при движении против течения. На режимах ХХ длительное время работают двигатели мобильных машин, эксплуатирующихся в условиях низких температур окружающего воздуха для поддержания приемлемого теплового состояния и исключения трудностей, связанных с проблемами холодного пуска.

На режимах МН и ХХ удельные, а также часовые, путевые, расходы топлива существенно возрастают в сравнении с расходами, свойственными режимам средних и повышенных нагрузок, а следовательно, возрастают и выбросы CO_2 , относящегося к парниковым газам. При этом возрастают выбросы с отработавшими газами ряда токсичных компонентов. Длительная работа на таких режимах нередко сопровождается снижением вязкости смазочного масла из-за попадания в него несгоревшего топлива, повышением отложений нагара на деталях цилиндро-поршневой группы, лопатках турбокомпрессора дизелей с наддувом, закоксовыванием сопловых отверстий форсунок и т.д., т.е. в конечном итоге снижением долговечности и надежности работы двигателя, потребностью более трудоемкого и сложного технического обслуживания, более частого ремонта.

Одним из методов повышения экономичности, снижения токсичности выбросов и т.д. при реализации таких режимов является метод регулирования нагрузки дизеля изменением его рабочего объема. Исследования показали, что уменьшение рабочего объема при снижении нагрузки позволяет повысить экономичность, улучшить экологические качества двигателя и т.д. Результаты таких исследований нашли практическое применение прежде всего при создании гибридных, комбинированных энергетических установок, содержащих дизель с уменьшенным рабочим объемом и электродвигатель с аккумулятором энергии.

Для реализации метода регулирования дизеля изменением его рабочего объема разрабатываются системы топливоподачи, регулирования фаз газообмена, изменения кинематических схем движения поршней, отключения части коленчатого вала со своими поршнями и т.д. В простейшем случае такое регулирование достигается путем отключения-включения части цилиндров или рабочих циклов, что выполняется только отключением части цилиндров или отдельных циклов работы дизеля, т.е. изменением числа z активных, не отключенных цилиндров.

Для дизеля с числом цилиндров, равным i , рабочий объем определяется соотношением

$$i \cdot V_h = i \cdot (\pi \cdot D^2) \cdot S / 4 \text{ (дм}^3\text{)},$$

где D и S — диаметр цилиндра и ход поршня (дм).

При реализации метода рабочий объем двигателя составляет $z \cdot V_h$ (дм³), где z (число активных, невыключенных цилиндров) изменяют при регулировании развиваемой двигателем мощности [1].

Физический смысл метода заключается в том, что при работе дизеля на МН или ХХ происходит отключение подач топлива в часть цилиндров (происходит их деактивация) и, следовательно, штатный регулятор частоты вращения вала для поддержания исходной частоты и нагрузки повышает подачу топлива в активные цилиндры, они выходят на режим повышенной цилиндровой нагрузки, что и приводит к повышению экономичности и т.д. Возможность достижения такого эффекта можно объяснить анализом типичных нагрузочных характеристик дизеля (рис. 1) [2].

График (рис. 1) показывает, что при переходе активного цилиндра с режима, например, ХХ ($p_e = 0, p_i \approx 0,22$ МПа) или некоторой минимальной нагрузки на режим почти средней нагрузки (например, $p_e = 0,3$ МПа, т.е. $\sim 40\%$ от полной) достигается уменьшение удельного расхода топлива, например, от 500 до 280 г/(кВт·ч), т.е. на 44%. Достижение этого эффекта обеспечивается повышением индикаторного, механического и эффективного КПД. Рост индикаторного КПД в этом случае объясняется тем, что при повышении цикловых подач топлива улучшается качество топливоподачи, распыливания и распределения топлив по камер сгорания, улучшается процесс смесеобразования и следовательно — сгорания. Кроме того, происходит стабилизация цикловых подач от цикла к циклу и повышение равномерности по цилиндрам. Соответствующим образом изменяются и коэффициенты избытка воздуха (α) по цилиндрам и циклам. А поскольку характеристики $g_i = f(\alpha)$ и $\eta_i = f(\alpha)$ имеют нелинейный характер, уменьшение неравномерности и нестабильности цикловых подач или составов смеси приводит к росту КПД и снижению удельного расхода топлива. Кроме того, повышение производительности системы топливоподачи обеспечивает изменение вида скоростной характеристики ($M_e = f(n)$), приводя к росту коэффициента приспособляемости ($K = M_{e, \max.} / M_{e, \text{ном.}}$). Это повышает фактор устойчивости ($K_g = (\Delta M_c - \Delta M_e) / \Delta n$) режима работы дизеля с потребителем (с моментом сопротивления M_c). Повышенная устойчивость режима приводит к росту его КПД по показанной выше причине.

При регулировании дизеля отключением части цилиндров абсолютные значения механических потерь можно считать зависящими только от частоты вращения вала. Экспериментально эти потери определяются методом прокрутки вала дизеля от постороннего источника при выключенных подачах топлива или методом включения-выключения цилиндров с последующим анализом характеристик разгона-выбега. Реально при отключении части цилиндров механические потери могут дополнительно зависеть от изменения теплового состояния двигателя, от давления в цилиндрах и изменения насосных потерь при процессах газообмена. Поддержание повышенного теплового состояния отключенных цилиндров в двигателях, в которых происходит отключение одних и тех же и одного и того же количества цилиндров, иногда обеспечивается использованием например, свечей накаливания, которые включаются при отключении данного цилиндра. Очевидна сложность такого решения. Поддержание повышенного теплового состояния свя-

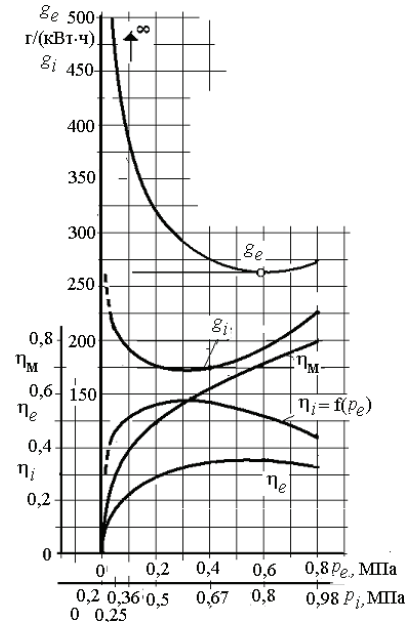


Рис. 1. Нагрузочная характеристика дизеля:

p_e, p_i — средние эффективное и индикаторное давления полноразмерного дизеля ($z = i$) или одного из активных цилиндров; η_e, η_i, η_m — эффективный, индикаторный и механический КПД; g_e, g_i — удельные эффективный и индикаторный расходы топлива

зана также с необходимостью снижения повышенных термических нагрузок в цилиндрах, которые включаются после достаточно длительного отключенного состояния.

При отключении части цилиндров происходит увеличение давления газов в активных цилиндрах и снижение давлений в деактивированных, т.е. в части цилиндров механические потери могут возникать, а в другой части снижаться. В среднем влиянием этого параметра на механические потери, как правило, можно пренебречь.

Поддержание теплового состояния исходного режима МН может происходить, если алгоритм регулирования двигателя изменением рабочего объема подразумевает изменение номеров отключаемых-включаемых цилиндров, т.е. система регулирования должна обеспечивать включение-выключение отдельных цилиндров, групп цилиндров при изменении их номеров, причем на достаточно короткое время, в пределе — на время одного цикла (отключение циклов).

Изменение насосных потерь связано со снижением температуры газов (воздуха) выталкиваемых из отключенного цилиндра, т.е. с ростом их плотности. Однако чередование отключенных и включенных цилиндров снижает или устраняет и этот отрицательный фактор.

Если система регулирования позволяет менять номера отключаемых цилиндров, то это обеспечивает также равномерность износов по цилиндрам.

Одним из достоинств систем регулирования дизеля отключением — включением цилиндров является возможность повысить быстродействие системы регулирования, путем исключения задержек срабатывания (перемещения) рейки топливного насоса.

Одним из новых направлений применения регулирования дизеля отключением цилиндров является возможность повышения экономии дизельного топлива замещением его альтернативными, например, газовыми. Суть здесь заключается в том, что газодизели со смешанным смесеобразованием могут использовать, например, природный газ до нагрузок не ниже 30—40%. Это связано с тем, что низкое тепловое состояние заряда при низких нагрузках ухудшает или делает невозможным организацию газодизельного процесса при минимальной дозе запального дизельного топлива, так как на этих режимах теряется способность к самовоспламенению запального дизельного топлива. Поэтому на таких режимах прекращают подачу в цилиндры газа. При отключении части цилиндров на режимах малых нагрузок, когда активные цилиндры работают с повышенными нагрузками, такой недостаток устраняется.

В течение нескольких лет в РУДН разрабатывались системы такого назначения, содержащие отключатели подачи топлива, новизна и эффективность которых защищена рядом авторских свидетельств и патентов [3—6]. Одной из систем, реализующих такое регулирование и содержащих отключатель подачи топлива в дизель (рис. 2), является система топливоподачи с регулированием начального давления (РНД) топлива в линиях высокого давления и электромагнитного управления клапанами РНД.

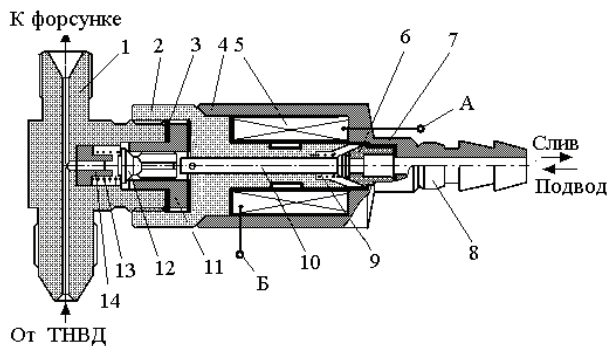


Рис. 2. Схема отключателя подачи топлива к форсунке дизеля от топливного насоса высокого давления (ТНВД):

А, Б — контакты электропитания катушки; 1 — штуцер; 2 — корпус; 3 — уплотнение; 4 — корпус электромагнитной катушки; 5 — электромагнитная катушка; 6 — магнитный сердечник; 7 — изоляция; 8 — ниппель; 9 — возвратная пружина; 10 — полый шток; 11 — седло клапана регулирования начального давления (РНД); 12 — клапан РНД; 13 — ограничитель хода клапана РНД; 14 — возвратная пружина клапана РНД

Особенностью отключателя является возможность использования низковольтного напряжения, свойственного электрооборудованию транспортных средств (12—36 вольт), так как клапан РНД 12 открывается благодаря перепаду давления на нем в периоды после отсечки подачи насосом (ТНВД). Отсечка подачи формирует в линиях высокого давления (ЛВД) топливной системы волновые процессы, благодаря которым при прохождении волны пониженного давления мимо клапана РНД 12 он открывается. Удержание клапана в открытом состоянии для пропуска подачи топлива в дизель в очередном цикле топливоподачи происходит с помощью электромагнитной катушки 5, которая запитывается током в произвольный момент времени до момента отсечки подачи. Магнитное поле катушки втягивает магнитный сердечник 6, связанный жестко со штоком 10. Он нажимает на клапан РНД 12 и удерживает его в открытом состоянии. При очередном нагнетательном ходе плунжера ТНВД подаваемое им топливо сливается в линию низкого давления (слив). При снятии напряжения с катушки 5 возвратные пружины 9 и 14 возвращают клапан РНД в закрытое состояние на седло 11. Очередная порция топлива, нагнетаемого ТНВД, поступает к форсунке и обычным порядком впрыскивается в цилиндр дизеля. При этих процессах происходит регулирование начального давления топлива в ЛВД. Это происходит следующим образом. При отсечке очередной подачи клапан РНД 12 также открывается, благодаря волновому процессу в ЛВД, но не удерживается в открытом состоянии, так как на катушку 5 не подано напряжение. Благодаря пониженному давлению под клапаном 12 топливо из линии низкого давления (подвод) поступает в ЛВД, повышая и стабилизируя в ней начальное давление, что повышает экономичность и эффективность работы топливной аппаратуры в очередных циклах топливоподачи [7].

Экспериментальные исследования такого отключателя подачи топлива подтвердили возможность отключения подачи на время, сравнимое со временем одного цикла (рис. 3). На осциллограмме видно, что открытие клапана РНД 4 происходит после формирования волнового процесса при отсечке подачи 3 при условии подключения электромагнита привода в точке 1 до появления волнового процесса.

Работоспособность системы отключения цилиндров или циклов проверена экспериментальными исследованиями дизелей типа Д-12 (12 ЧН 15/18), Д-240 (4 Ч 11/12,5), ЯМЗ-238 (8 ЧН 13/14), КАМАЗ (8 Ч 12/12) и ряда других.

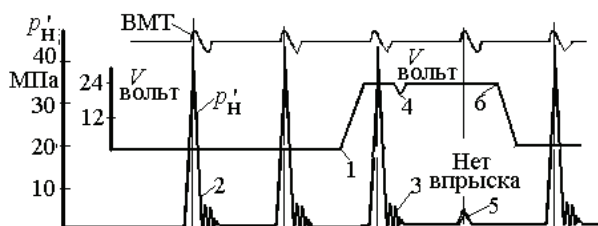


Рис. 3. Осциллограммы процесса отключения одного цикла дизеля
ипа 4 Ч 11/12,5 при $n = 700$ 1/мин:

- 1 — включение электромагнита привода; 2 — осциллограмма давления топлива в штуцере топливного насоса; 3 — волновой процесс при отсечке подачи; 4 — момент открытия клапана РНД; 5 — пропуск впрыскивания; 6 — выключение питания электромагнита

Существенными преимуществами разработки по сравнению с рядом известных систем отключения постоянного числа цилиндров являются следующие:

- возможность отключения-включения произвольного, заранее заданного числа цилиндров в соответствии с избранным и заданным алгоритмом управления;
- возможность отключения-включения одного или нескольких цилиндров на время одного цикла, причем в соответствии с заданным алгоритмом управления;
- возможность регулировать начальное давление топлива в линиях высокого давления после включения в работу цилиндров, ранее выключенных, для повышения качества процессов топливоподачи и исключения переходных процессов в линиях высокого давления;
- возможность управления системой отключения-включения с помощью низковольтной системы электропитания, свойственной бортовой системе электропитания автомобиля.

Очевидно, что управление системой отключения цилиндров или циклов требует разработки соответствующего алгоритма управления, который должен учитывать предъявляемые к системе требования по быстродействию, а к двигателю — по уровню равномерности хода, вибрации и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Валеев Д.Х., Олесов И.Ю., Патрахальцев Н.Н. и др.* Возможности улучшения экономических и экологических свойств дизелей КАМАЗ-740 отключением цилиндров и циклов на режимах холостых ходов и малых нагрузок // *Двигателестроение*. — 1991. — № 8, 9. — С. 62—69. [*Valeev D.H., Olesov I.Yu., Patrahaltsev N.N. i dr.* *Vozmozhnosti ulutheniya ekonomotheskih i ekologitheskikh svojstv dizelej KAMAZ-740* // *Dvigatellestroenie*. — 1991. — N 8—9. — S. 62—69.]
- [2] *Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др.* Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — 4-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1983. — 372 с., ил. — С. 253—256. [*Vyrubov D.N. i dr.* *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 4-e izd. — М.: Mashinostroenie, 1983. — 372 s., il.]

- [3] *Патрахальцев Н.Н., Олесов И.Ю., Камышников О.В. и др.* Авт. св. 1657703 РФ. Система регулирования многоцилиндрового дизеля // БИ. — 1991. — № 23. [*Patrahalsev N.N. i dr.* Avt. Sv. 1657703 RU // ВІ. — 1991. — N 23.]
- [4] *Патрахальцев Н.Н., Олесов И.Ю., Камышников О.В. и др.* Авт. св. 1694955 РФ. Топливная система дизеля с отключением цилиндров // БИ. — 1991. — № 44. [*Patrahalsev N.N. i dr.* Avt. Sv. 1694955 RU // ВІ. — 1991. — N 44.]
- [5] *Патрахальцев Н.Н., Олесов И.Ю., Эммиль М.В. и др.* Авт. св. 1694956 РФ. Топливная система дизеля с отключаемыми цилиндрами // БИ. — 1991. — № 44. [*Patrahalsev N.N. i dr.* Avt. Sv. 1694956 RU // ВІ. — 1991. — N 44.]
- [6] *Поликер Б.Е., Аникин С.Н., Патрахальцев Н.Н. и др.* Патент 2108472 РФ. Способ работы дизеля автосамосвала (варианты) // БИ. — 10.04.98. [*Poliker B.E. I dr. Patent 2108472 RU Sposob raboty diselja avtosamosvala (varianty) // ВІ. — 10.04.98.]*
- [7] *Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А., Виноградский В.Л.* Регулирование начального давления топлива — методы и средства повышения экономичности и эффективности работы дизелей // Автомобильная промышленность. — 2002. — № 3. — С. 8—19. [*Patrahalsev N.N. i dr. Regulirovanie nathalnogo davlenija topliva — metody i sredstva economical effectivity // Automobile promyshlennost. — 2002. — N 3. — S. 8—19.]*

THE SYSTEM OF DIESEL ENGINE REGULATON BY VARIATION OF DISPLASEMENT

**N.N. Patrakhaltsev, A.A. Savastenکو,
I.A. Petrunya, T.S. Anoshina**

Department of Heat Engineering and Heat Engines
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

There presented the system of disconnection of diesel's cylinders or cycles, invented in Peoples' Friendship University of Russia. The system may be employed for diesel regulation by variation of working volume, displacement.

Key words: diesel, efficiency, economy, regulation, disconnection of cylinders, variation of diesel's displacement.