

УДК 621.43

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПУТЕМ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТИ ЦИЛИНДРОВ

Бердников А.А., Мингазов С.Р., Жуков А.А.

ФГКВООУ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации»,
Пермь, e-mail: aa-berdnikov@mail.ru

Для улучшения экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания желательно при работе на холостом ходу и малых нагрузках отключать часть цилиндров. Анализ показывает, что отключение части цилиндров приводит к понижению теплонапряженности цилиндров двигателя, уменьшению расхода топлива. Суть метода состоит в том, что на режимах холостого хода и малых нагрузок подача топлива в часть цилиндров прекращается. Однако длительная работа двигателя с отключением одних и тех же цилиндров приводит к набрасыванию и накоплению в них смазочного материала, что может увеличить механические потери и снизить эффективный коэффициент полезного действия двигателя. Устранить эти недостатки можно, применив метод чередования включенных и выключенных цилиндров. В статье предлагается методика формирования порядка отключения части цилиндров двигателя с целью получения необходимой мощности двигателя для эффективной и экономичной работы двигателя.

Ключевые слова: экономичность двигателей, рабочий цикл, отключение цилиндров, система питания

IMPROVING ECONOMIC PERFORMANCE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY SWITCHING OFF OF THE CYLINDERS

Berdnikov A.A., Mingazov S.R., Zhukov A.A.

Federal state official military establishment of higher education «Perm military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation», Perm, e-mail: aa-berdnikov@mail.ru

To improve the economic and environmental performance of internal combustion engines, heavy enforcement at idling and low load cylinder deactivation. Analysis shows that the disabling of the cylinder lowers the thermal stress of the engine, a reduction in fuel consumption. The method consists in the fact that at idle and low heating of-portion fuel supply to the cylinders of the stops. However, long-term operation of the engine and to disconnect the same cylinder leads to the spraying and accumulating in them the lubricant that can increase the mechanical losses and reduce the effective efficiency of the motor. Eliminate these disadvantages can, using the method of alternation included and switched off cylinders. The paper proposes a method of forming the order of disconnection of the cylinders of the engine in order to obtain the necessary engine power for efficient and economical operation of the engine.

Keywords: engine efficiency, operating cycle, engine shutdown, supply system

Для улучшения экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) желательно при работе на холостом ходу и малых нагрузках обеспечить работу не всех цилиндров, а нескольких, то есть отключать часть цилиндров. Это позволит поддерживать требуемый температурный режим при минимальном расходе топлива и улучшить его экологические показатели.

Эффективная мощность двигателя, то есть полезно используемая мощность при работе двигателя на внешний потребитель, является функцией ряда параметров [1]:

$$N_e = \frac{V_n \cdot p_e \cdot n}{z \cdot 600}, \quad (1)$$

где N_e – эффективная мощность, кВт;

V_n – литраж двигателя, л;

p_e – среднее эффективное давление, Па;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

z – коэффициент тактности, для двухтактных двигателей – 1, для четырехтактных – 2.

С точки зрения конструктивного исполнения двигателя в формуле (1) интересен литраж. Литраж двигателя обуславливает практически пропорциональное изменение величины заряда, поступающего в цилиндры, что соответственно сказывается на мощности двигателя. Литраж двигателя может быть изменен как за счет размерности цилиндров, так и путем изменения их числа, то есть отключением части цилиндров, в результате можно варьировать мощностью двигателя. В то же время уменьшение числа работающих цилиндров приводит к уменьшению относительной утечки через поршневые кольца.

Уменьшение числа работающих цилиндров, то есть отключение части цилиндров, приведет к снижению теплонапряженности цилиндров двигателя. Теплонапряженность зависит от количества тепла, отводимого в систему охлаждения, которое выражается через теплоту сгоревшего топлива, а также

от площади внутренней поверхности цилиндра [1]:

$$q_{\text{цил}} = \frac{Q_{\text{охл}}}{F} = \frac{a \cdot G_T \cdot Q_n}{F}, \quad (2)$$

где $q_{\text{цил}}$ – теплонапряженность цилиндров двигателя, Дж/м²·ч;

$Q_{\text{охл}}$ – количество теплоты, отводимое в систему охлаждения, Дж;

F – общая площадь внутренней поверхности цилиндра, м²;

a – доля теплоты, отводимая в систему охлаждения двигателя, $a = 0,13 - 0,35$;

G_T – часовой расход топлива, кг/ч;

Q_n – теплота сгорания топлива, Дж/кг.

Учитывая зависимость часового расхода топлива от удельного эффективного расхода топлива и эффективной мощности двигателя,

$$G_T = g_e \cdot N_e, \quad (3)$$

где g_e – эффективного расхода топлива, г/кВт·ч, получим зависимость теплонапряженности цилиндров двигателя от расхода топлива и мощности двигателя:

$$q_{\text{цил}} = \frac{a \cdot g_e \cdot N_e \cdot Q_n}{F}. \quad (4)$$

Таким образом, анализ выражений (1) и (4) показывает, что отключение части цилиндров, изменяя литраж, приводит к понижению теплонапряженности цилиндров двигателя. А из уравнения (3) следует, что в таком случае еще и понижается расход топлива. Понижение расхода топлива в этом случае наблюдается за счет снижения мощности, однако на режимах холостого хода и малых нагрузок снижение эффективной мощности просто необходимо, так как цилиндры двигателя на указанных режимах становятся «недогруженными», в результате удельный расход топлива оказывается в 1,5–5 раза выше, чем на режиме номинальной мощности [4]. Поэтому при эксплуатации двигателя необходимо стремиться к тому, чтобы кривая эффективной мощности всегда располагалась на кривой минимального удельного расхода топлива (рис. 1) [3]. А на режимах холостого хода и малых нагрузок этого можно добиться путем отключения части цилиндров, таким образом «догружая» рабочие цилиндры.

Суть метода повышения эксплуатационной топливной экономичности двигателя на режимах малых нагрузок, холостых и принудительных холостых ходах состоит в том, что на этих режимах подача топлива в часть цилиндров прекращается [5], а оставшиеся включенными автоматически переводятся на работу на более богатых смесях, соответствующих максимумам зависимостей эффек-

тивного коэффициента полезного действия от состава смеси. Однако, как уже отмечалось, длительная работа двигателя с отключением одних и тех же цилиндров приводит к снижению теплового состояния отключенных цилиндров, а также к набрасыванию и накоплению в них смазочного материала. Все это может увеличить механические потери и снизить эффективный коэффициент полезного действия двигателя. Кроме того, после приема нагрузки в этих случаях возникает опасность разгона турбоагрегата, закоксовывания и залегания поршневых колец и т.д. Устранить эти недостатки можно, применив метод чередования через какое-то незначительное время (порядка долей секунды) включенных и выключенных цилиндров.

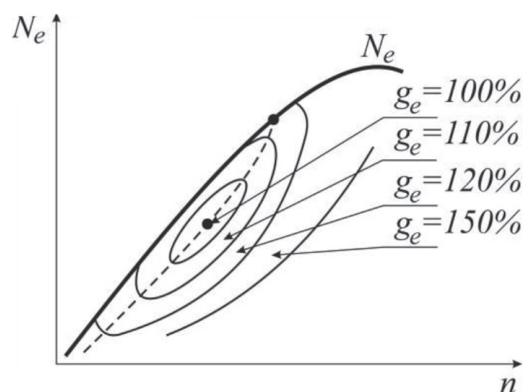


Рис. 1. Области удельных расходов топлива на внешней характеристике двигателя:
 ---- наибольшая мощность двигателя при минимальных удельных расходах топлива;
 g_e – кривые постоянных удельных эффективных расходов топлива; N_e – эффективная мощность;
 n – частота вращения коленчатого вала

Чередование включенных и выключенных цилиндров может выполняться по методике, изложенной в трудах [2, 6]. Однако, с целью обеспечения возможности отключения цилиндров с учетом уравновешенности двигателя, необходимо эту методику уточнять.

Рассмотрим некоторые алгоритмы отключения цилиндров ДВС на примере шести- и восьмицилиндровых V-образных двигателей, работа которых особенно неэффективна на режимах холостого хода и малых нагрузок.

Для понимания происходящих процессов под рабочим циклом будем понимать четыре периодически повторяющихся процесса: впуск, сжатие, рабочий ход (в случае отключения цилиндра – пропуск рабочего хода), выпуск. При этом рабочий цикл протекает 720° по углу поворота коленчатого вала (ПКВ).

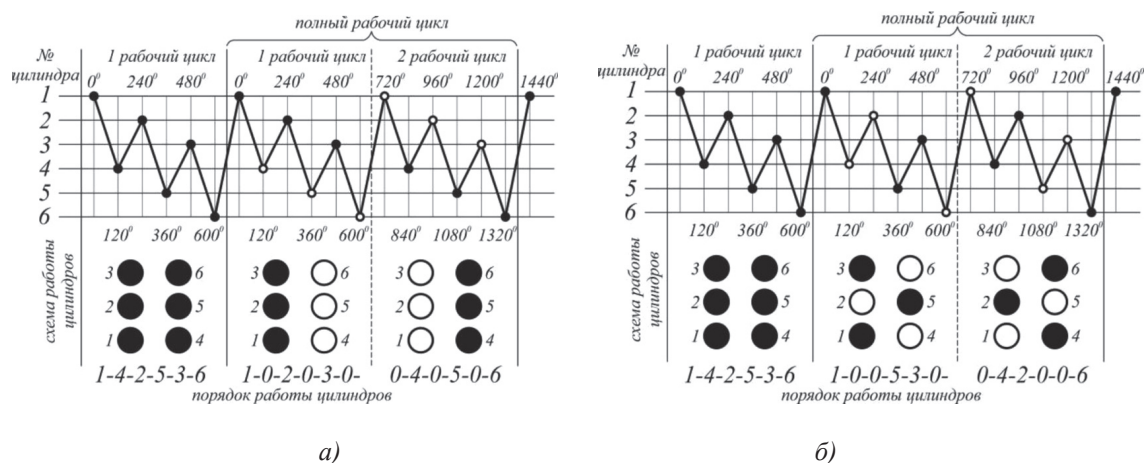


Рис. 2. Алгоритм отключения цилиндров для получения 50% мощности шестичилиндрового V-образного двигателя: а – отключение цилиндров одного блока; б – отключение цилиндров обоих блоков

Таблица 1
Алгоритмы отключения цилиндров шестичилиндрового V-образного двигателя

Расположение цилиндров			6 V-образный					
Порядок работы цилиндров			1-4-2-5-3-6		1-4-2-5-3-6		1-4-2-5-3-6	
Реализуемая мощность от номинальной			20% мощности		28,6% мощности		60% мощности	
Полный рабочий цикл:	3600 ⁰	1 рабочий цикл 720 ⁰	1-0-0-0-0-6		1-0-0-5-0-0		1-0-2-0-3-6	
		2 рабочий цикл 720 ⁰	0-0-0-0-3-0		0-4-0-0-3-0		0-4-0-5-3-0	
		3 рабочий цикл 720 ⁰	0-0-0-5-0-0		0-0-2-0-0-6		1-0-2-5-0-6	
		4 рабочий цикл 720 ⁰	0-0-2-0-0-0		0-0-0-5-0-0		0-4-2-0-3-0	
		5 рабочий цикл 720 ⁰	0-4-0-0-0-0		1-0-0-0-3-0		1-4-0-5-0-6	
	5040 ⁰	6 рабочий цикл 720 ⁰			0-4-0-0-0-6			
		7 рабочий цикл 720 ⁰			0-0-2-0-0-0			

Под полным рабочим циклом будем понимать совокупность рабочих циклов, за которую в каждом цилиндре произойдет минимальное количество рабочих ходов (включение цилиндра), и в случае отключения, пропусков рабочих ходов и этот цикл окажется замкнутым, то есть будет иметь возможность повторяться бесконечное множество раз.

Алгоритм отключения цилиндров шестичилиндрового V-образного двигателя с порядком работы 1-4-2-5-3-6 для получения 50% мощности двигателя представлен на рис. 2. Здесь и далее залитые кружки

показывают цилиндры, в которых совершается рабочий цикл с рабочим ходом, незаполненные кружки показывают отключенные цилиндры, то есть пропуск рабочего хода.

Для получения 50% мощности в шестичилиндровом двигателе необходимо отключить половину цилиндров, то есть три. Здесь алгоритм отключения может быть таким, что отключаются три цилиндра одного блока (рис. 2, а), однако с точки зрения уравновешенности двигателя отключение цилиндров целесообразнее проводить по схеме, представленной на

рис. 2, б. В этом алгоритме полный рабочий цикл совершается за два рабочих цикла и составляет $2 \times 720 = 1440^\circ$ ПКВ. По горизонтальным линиям цилиндров видим, что за полный рабочий цикл каждый цилиндр отключится по одному разу,

в этом случае порядок работы цилиндров составит: 1-0-0-5-3-0-0-4-2-0-0-6 («0» – означает отключение цилиндра), то есть в этом порядке работы чередуются попарно включенные и отключенные цилиндры, и цикл получается замкнутым.

Таблица 2

Алгоритмы отключения цилиндров восьмицилиндрового V-образного двигателя

Расположение цилиндров		8 V-образный		8 V-образный		8 V-образный	
Порядок работы цилиндров		1-5-4-2-6-3-7-8		1-6-3-5-4-7-2-8		1-8-3-6-4-5-2-7	
Полный рабочий цикл: 3600°; 80% мощности	1 рабочий цикл 720°	1-5-4-2-0-3-7-8-		1-6-3-5-0-7-2-8-		1-8-3-6-0-5-2-7-	
	2 рабочий цикл 720°	1-0-4-2-6-3-0-8-		1-0-3-5-4-7-0-8-		1-0-3-6-4-5-0-7-	
	3 рабочий цикл 720°	1-5-4-0-6-3-7-8-		1-6-3-0-4-7-2-8-		1-8-3-0-4-5-2-7-	
	4 рабочий цикл 720°	0-5-4-2-6-0-7-8-		0-6-3-5-4-0-2-8-		0-8-3-6-4-0-2-7-	
	5 рабочий цикл 720°	1-5-0-2-6-3-7-0		1-6-0-5-4-7-2-0		1-8-0-6-4-5-2-0	
Полный рабочий цикл: 2160°; 66,7% мощности	1 рабочий цикл 720°	1-5-0-2-6-0-7-8-		1-6-0-5-4-0-2-8-		1-8-0-6-4-0-2-7-	
	2 рабочий цикл 720°	0-5-4-0-6-3-0-8-		0-6-3-0-4-7-0-8-		0-8-3-0-4-5-0-7-	
	3 рабочий цикл 720°	1-0-4-2-0-3-7-0		1-0-3-5-0-7-2-0		1-0-3-6-0-5-2-0	
Полный рабочий цикл: 3600°; 60% мощности	1 рабочий цикл 720°	1-0-4-2-0-3-0-8-		1-0-3-5-0-7-0-8-		1-0-3-6-0-5-0-7-	
	2 рабочий цикл 720°	1-0-4-0-6-3-0-8-		1-0-3-0-4-7-0-8-		1-0-3-0-4-5-0-7-	
	3 рабочий цикл 720°	0-5-4-0-6-0-7-8-		0-6-3-0-4-0-2-8-		0-8-3-0-4-0-2-7-	
	4 рабочий цикл 720°	0-5-0-2-6-0-7-0-		0-6-0-5-4-0-2-0-		0-8-0-6-4-0-2-0-	
	5 рабочий цикл 720°	1-5-0-2-0-3-7-0		1-6-0-5-0-7-2-0		1-8-0-6-0-5-2-0	
Полный рабочий цикл: 2160°; 33,3% мощности	1 рабочий цикл 720°	1-0-0-2-0-0-7-0-		1-0-0-5-0-0-2-0-		1-0-0-6-0-0-2-0-	
	2 рабочий цикл 720°	0-5-0-0-6-0-0-8-		0-6-0-0-4-0-0-8-		0-8-0-0-4-0-0-7-	
	3 рабочий цикл 720°	0-0-4-0-0-3-0-0		0-0-3-0-0-7-0-0		0-0-3-0-0-5-0-0	

С целью изменения мощности двигателя и достижения максимальной экономичности работы двигателя на режимах холостого хода и частичных нагрузок, необходимо изменить алгоритм отключения цилиндров. Такие алгоритмы для шестицилиндрового V-образного двигателя представлены в табл. 1.

По табл. 1 видим, что для получения 20% мощности полный рабочий цикл можно реализовать в пяти рабочих циклах, то есть за 3600° ПКВ. При этом в 1 рабочем цикле отключаются четыре цилиндра, а в остальных – по пять. В вертикальных столбцах порядка работы цилиндров двигателя видим, что за полный рабочий цикл каждый цилиндр в работу включится по одному разу и по четыре раза отключится, то есть по порядку работы цилиндров после каждого сработавшего цилиндра идет четыре отключенных цилиндра. Порядок работы цилиндров при этом составит 1-0-0-0-0-6-0-0-0-0-3-0-0-0-0-5-0-0-0-0-2-0-0-0-0-4-0-0-0-0 и будет замкнутым, а ДВС будет выдавать 20% мощности.

Получить от двигателя 60% мощности можно по алгоритму 1-0-2-0-3-6-0-4-0-5-3-0-1-0-2-5-0-6-0-4-2-0-3-0-1-4-0-5-0-6 в пяти рабочих циклах за 3600° ПКВ. Логика отключения в этом случае выбрана следующая: 0-«+»-0-«+»-«+»-, где «+» – включение цилиндра. Такая логика отключения цилиндров позволяет замкнуть полный рабочий цикл, а в каждом цилиндре произойдет два отключения и три включится в работу.

Если задать логику отключения «+»-0-0-«+»-0-0-0-, то такой полный рабочий цикл замкнется за семь рабочих циклов, то есть за 5040°, и каждый цилиндр только дважды включится в работу. Порядок работы цилиндров: 1-0-0-5-0-0-0-4-0-0-3-0-0-0-2-0-0-6-0-0-0-5-0-0-1-0-0-0-3-0-0-4-0-0-0-6-0-0-2-0-0-0, а двигатель начнет выдавать, примерно, 28,6% мощности.

Таким образом, по предложенной методике можно задать двигателю определенный порядок работы цилиндров для реализации необходимой мощности. Однако необходимо учитывать порядок работы двигателя при отключенных цилиндрах с точки зрения уравниваемости двигателя.

Так, например, рассматривая алгоритмы отключения восьмицилиндрового V-образного двигателя с различным порядком работы цилиндров (табл. 2), можно заметить, что при отключении цилиндров

по одной и той же методике двигатель с порядком работы цилиндров 1-5-4-2-6-3-7-8 будет менее уравновешен. Это видно по схемам работы цилиндров. Например, при реализации 80% мощности во 2 и 4 рабочих циклах отключаются цилиндры одного блока, при реализации 60% мощности в 1 и 3 рабочих циклах отключаются по три цилиндра одного блока, а при реализации 33,3% мощности во 2 и 3 рабочих ходах в работу включаются цилиндры только одного блока, тогда как для двигателей с порядками работы 1-6-3-5-4-7-2-8 и 1-8-3-6-4-5-2-7 таких недостатков нет.

Таким образом, повышения экономических показателей ДВС можно добиться путем отключения части цилиндров на режимах частичных нагрузок и холостом ходу. С целью предотвращения нежелательных последствий при отключении одних и тех же цилиндров желательно применять метод чередования включенных и выключенных цилиндров по предложенной методике. Получением требуемой мощности по тому или иному алгоритму (порядку работы) можно добиться оптимального расхода топлива – экономичности ДВС.

Список литературы

1. Белов П.М., Бурычко В.Р., Акатов В.И. Двигатели армейских машин. Часть первая. Теория [Текст] / П.М. Белов, В.Р. Бурычко, В.И. Акатов. – М.: Воениздат, 1971. – 512 с.
2. Грабовский А.А. ДВС с дискретным изменением мощности [Текст] / А.А. Грабовский // Науч. попул. журн. Автомобильная промышленность. – ООО «Издательство Машиностроение», 2014. – № 1. – С. 8–12.
3. Дизели: Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп. [Текст] / Под общ. ред. В.А. Ваншейдта, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова. – Л., «Машиностроение» (Ленингр. отделение), 1977. – 480 с.
4. Мингазов С.Р., Бердников А.А. Форсунка с устройством отключения подачи топлива [Текст] / С.Р. Мингазов, А.А. Бердников // Сборник научных материалов. Выпуск 2. Актуальные вопросы совершенствования военной и специальной техники. Под общ. ред. А.А. Бердникова. – Пермь: ПВИ ВВ МВД России, 2016. – С. 24–27.
5. Пат. 165209 Российская Федерация, МПК F 02 M 21/02. Устройство для отключения подачи топлива к форсунке [Текст] / Мингазов С.Р., Бердников А.А., Дмитриев А.И.; заявители Мингазов С.Р., Бердников А.А., Дмитриев А.И.; патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский военный институт внутренних войск Министерства внутренних дел Российской Федерации» – № 2016109343/06; заявл. 15.03.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – 1 с.
6. Пат. 2380562 Российская Федерация, МПК F02D 17/02. Способ дискретного изменения мощности ДВС (Варианты) [Текст] / Грабовский А.А.; заявитель и патентообладатель Грабовский А.А. №2008104241/06; заявл. 04.02.2008; опубл. 27.01.10, Бюл. № 3. – 80 с.