

Таблица I

Статистическое распределение величины
снижения мощности

Частота	Ширина	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95-	95-
	разря- да	%	%	%	%	%	95%	100%
		1	2	2	3	7	5	5
P		$\bar{25}$						

величины. Недостаток мощности объясняется в первую очередь отклонениями регулировок от нормальных величин.

Например, неправильную настройку регулятора /заниженные обороты/ имели 12 двигателей. Многие двигатели работали с неправильной регулировкой угла опережения впрыска и некачественным распылом топлива форсунками.

Если своевременно контролировать мощность тракторных двигателей при эксплуатации и не допускать ее отклонений от нормальных значений, то это будет равносильно пополнению тракторного парка Иркутской области 1000-1200 тракторами марки ДТ-75.

Чтобы реализовать этот резерв, необходимо внедрять в производственную практику колхозов и совхозов бестормозные методы проверки мощностных показателей тракторных двигателей. Бестормозные методы просты и доступны, они не требуют больших затрат труда и средств.

И.П.Терских,

канд.техн.наук

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СОЧЕТАНИЙ РАБОТАЮЩИХ И ВЫКЛЮЧЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

При парциальных испытаниях двигателя выключаются из работы один или группа цилиндров. Этим самым создаются благоприятные возможности для определения комплекса диагностических показателей, характеризующих

техническое состояние двигателя.

Различных вариантов сочетания работающих и выключенных цилиндров может быть большое множество, например, в общем случае только для 4-цилиндрового двигателя их насчитывается 16 /табл. I/. С увеличением количества цилиндров двигателя число сочетаний увеличивается экспоненциально.

Таблица I
Количество вариантов сочетаний работающих и выключенных цилиндров для 4-цилиндрового двигателя

I-р, 2-р, 3-р, 4-р I	I-в, 2-р, 3-р, 4-р 2	I-р, 2-в, 3-р, 4-р 3	I-р, 2-р, 3-в, 4-р 4
I-р, 2-р, 3-р, 4-в 5	I-р, 2-р, 3-в, 4-в 6	I-р, 2-в, 3-р, 4-в 7	I-р, 2-в, 3-в, 4-р 8
I-в, 2-р, 3-р, 4-в 9	I-в, 2-р, 3-в, 4-р 10	I-в, 2-в, 3-р, 4-р 11	I-р, 2-в, 3-в, 4-в 12
I-в, 2-р, 3-в, 4-в 13	I-в, 2-в, 3-р, 4-в 14	I-в, 2-в, 3-в, 4-р 15	I-в, 2-в, 3-в, 4-в 16

В таблице цифрами обозначены номера цилиндров, буквами "р" и "в" - "работает" и "выключен". Варианты сочетаний обозначены отдельно цифрами в правом нижнем углу каждого прямоугольника. Варианты 2, 3, 4, 5 соответствуют поочередной работе двигателя с одним выключенным цилиндром, а 12, 13, 14, 15 - с одним работающим. Остальные варианты, кроме 1 и 2, соответствуют работе двигателя на двух цилиндрах.

Чем больше число цилиндров у двигателя, тем больше вариантов сочетаний работающих и выключенных цилиндров. Поэтому выбор каких-то вполне определенных сочетаний для целей технического диагноза - задача немаловажная.

Необходимо так выбрать одно или несколько сочетаний, чтобы количество информации о состоянии цилиндров было максимальным. Число же сочетаний должно быть минимальным, но достаточным для решения диагности-

ческой задачи, причем сочетания работающих и выключенных цилиндров не должны повторяться, но обеспечить максимальную равномерность и устойчивость работы цилиндров. В связи с тем, что при парциальных испытаниях применяются различные догрузочные устройства, необходимо, чтобы при выбранных сочетаниях требовалась по возможности наименьшая догрузочная мощность.

Для рассмотрения вопроса о выборе сочетаний работающих и выключенных цилиндров при диагностике двигателя воспользуемся некоторыми положениями из теории вероятностей.

Двигатель можно представить как множество, состоящее из конечных подмножеств /цилиндров/ Z , т.е.

$$Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}, Z_n$$

где индексы $1, 2, \dots, n-1, n$ обозначают порядковый номер цилиндра. Конструкция двигателя "жесткая", расположение цилиндров не меняется.

Пусть из всех Z цилиндров нам требуется выбрать какое-то количество работающих Z_p . Обозначим $A_z^{Z_p}$ - число размещений работающих цилиндров из общего их количества, очевидно, что $A_z^{Z_p-1} = Z$, т.е. число размещений по одному работающему цилиндру будет равно количеству цилиндров двигателя. При двух работающих:

$$A_z^{Z_p=2} = A_z'(Z-1)$$

При трех работающих:

$$A_z^{Z_p=3} = A_z^2(Z-1)$$

И т.д.

Перемножая левые и правые части указанных выражений, получим общую формулу для всех возможных вариантов выбора работающих цилиндров.

$$A_z^{Z_p} = A_z'(Z-1)(Z-2)\dots(Z-Z_p+1) = \frac{Z!}{(Z-Z_p)!} \quad /I/$$

При этом обусловлено, что $0! = 1$, а варианты размещения отличаются хотя бы одним цилиндром в вы-

бранной группе Z_p из Z и порядком их расположения или тем и другим вместе.

В общем случае число всех различных перестановок Z цилиндров есть суммарное число разных способов, которыми цилиндры можно упорядочить в ряд. обозначим перестановки буквой P_z . Число P_z получается подстановкой $Z_p = Z$.

Фактически $A_z^{Z_p}$ означает число различных способов, которые Z_p могут быть выбраны из Z и упорядочены. Однако имеется только один способ выбора Z цилиндров из Z . A_z^Z есть суммарное число способов, которыми Z цилиндров могут быть упорядочены. Тогда:

$$P_z = A_z^{Z_p} = A_z^Z = \frac{Z!}{0!} = Z! \quad /1/$$

Из описания общего случая формула /1/ для размещений учитывает не только количество Z_p из Z , но и порядок их расположения. Например, при $Z = 4$, а $Z_p = 2$, т.е. у 4-цилиндрового двигателя выбирают для работы 2 цилиндра, $A_4^2 = \frac{4!}{2!} = 12$. У этого двигателя при попарно работающих цилиндрах можно составить следующие размещения:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. $Z_{p1} - Z_{p3}$ | 2. $Z_{p3} - Z_{p1}$ |
| 3. $Z_{p1} - Z_{p2}$ | 4. $Z_{p2} - Z_{p1}$ |
| 5. $Z_{p1} - Z_{p4}$ | 6. $Z_{p4} - Z_{p1}$ |
| 7. $Z_{p2} - Z_{p3}$ | 8. $Z_{p3} - Z_{p2}$ |
| 9. $Z_{p2} - Z_{p4}$ | 10. $Z_{p4} - Z_{p2}$ |
| II. $Z_{p3} - Z_{p4}$ | 12. $Z_{p4} - Z_{p3}$ |

Из примера видно, что в общем случае число размещений будет 12. Однако для работы двигателя нет никакой разницы, если будут работать первый и второй / $Z_{p1} - Z_{p2}$ / или второй и первый цилиндры / $Z_{p2} - Z_{p1}$ /. То же самое можно сказать и про перестановки P_z . Нас интересует не общий случай всех размещений и перестановок, а конкретный, применительно к диагностике автотракторных дизелей с условиями, оговоренными выше.

В связи с этим введем следующий, отличный от предыдущих термин - сочетание работающих и выключен-

ных цилиндров и обозначим его символом $C_Z^{Z_p}$. Он означает число различных способов, которыми можно выбрать Z_p из Z . Тогда $A_Z^{Z_p}$ - число различных способов, которыми Z_p могут быть выбраны из Z , а затем упорядочены, будет равно

$$A_Z^{Z_p} = C_Z^{Z_p} \cdot P_{Z_p} \quad (13)$$

Откуда

$$C_Z^{Z_p} = \frac{A_Z^{Z_p}}{P_{Z_p}} = \frac{Z!}{Z_p! Z_p!} \quad (14)$$

Современные отечественные автомобильные, тракторные, а также двигатели других самоходных машин имеют число цилиндров, равное 2, 3, 4, 6, 8, 12. Рассчитанное для них количество возможных сочетаний показано в таблице 2 /1/.

В общем случае для диагностики двигателя достаточно такой суммы сочетаний, при которой каждый цилиндр двигателя выключается или работает только один раз. Этого вполне достаточно, чтобы определить целый ряд диагностических параметров /шумы, стуки, компрессия, момент впрыска и др./ . Например, у 6-цилиндрового двигателя при выключении двух цилиндров достаточно 3 сочетаний из 15 возможных, у 8-цилиндрового /при $Z_p = 2!$ - 4 из 28 и т.д.

Для всех двигателей, имеющих четное число цилиндров, минимальное число сочетаний, удовлетворяющее такому требованию, равно 2. При этом двигатель работает поочередно с половиной выключенных цилиндров, т.е. при $Z_p = 0, 5Z$. За полный цикл испытаний каждый из цилиндров будет один раз работать и один раз выключаться. При других вариантах сочетания работающих и выключенных цилиндров минимальное их число для полного цикла испытаний другое /табл. 2, часть 1-я, знаменатель/.

При выборе сочетания работающих и выключенных цилиндров по этому параметру /минимизация числа сочетаний/ учитывается требование равномерности работы цилиндров. Например, при попарном выключении цилиндров 4-цилиндровый двигатель будет работать равномернее на

3-2-ом цилиндрах /табл.3/. Это вытекает из порядка работы цилиндров /1-3-4-2/. В данном случае рабочий цикл будет чередоваться равномерно с пропуском одного цилиндра.

"Выключение цилиндра" можно описывать как вероятностную характеристику. В самом деле мы можем выключать любой цилиндр или группу цилиндров, рассматривая эти действия как независимые. Неисправный цилиндр нам неизвестен. Приняв во внимание эти условия, нетрудно рассчитать вероятности выключения цилиндров для различных видов сочетаний /табл.2, П/.

Наилучший вариант, с точки зрения минимизации цикла испытаний, тот, у которого вероятность равна 0,5. Результаты подсчетов в графе П подтверждают данные графы I таблицы 2. Будем в дальнейшем называть наилучший вариант парциальных испытаний "основным". При этом варианте сочетаний требуется мощность тормозной установки в 2,5-3,0 раза меньше мощности испытываемого двигателя. Если известны механические потери двигателя, то этот вариант приобретает некоторую универсальность. Информация, полученная при основном варианте парциальных испытаний, может быть избыточной, что облегчает локализацию неисправностей. Избыточность информации получается за счет поочередной проверки работающих и выключенных цилиндров.

Важное значение в выборе сочетаний работающих и выключенных цилиндров имеет степень догрузки при парциальных испытаниях. Это весьма ценно при использовании догрузочных средств - дросселирования масла в гидросистеме трактора, дросселирования газов на выпуске и при испытаниях мощных двигателей на маломощных тормозных установках. Степень догрузки δ_d для различных вариантов сочетаний можно подсчитать по формуле Н.С. Ждановского /табл.2, Ш/.

$$\delta_d = 1 - \frac{Z_6}{Z \cdot \zeta_m}$$

151

где ζ_m - механический к.п.д. двигателя, равный 0,68-0,78.

Таблица 2

К выбору наиболее выгоднейшего сочетания режимов работы двигателя при парциальных испытаниях

Число цилиндров двигателя	Возможное число сочетаний работающих и выключенных цилиндров и минимальное, удовлетворяющее условиям парциальных испытаний/в знаменателе/										
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 ^{xx}
2	$\frac{2}{2}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	$\frac{3}{3}$	$\frac{3}{3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	$\frac{4}{4}$	$\frac{6}{2}$	$\frac{4}{4}$	-	-	-	-	-	-	-	ц
6	$\frac{6}{6}$	$\frac{15}{3}$	$\frac{20}{2}$	$\frac{15}{3}$	$\frac{6}{6}$	-	-	-	-	-	-
8	$\frac{8}{8}$	$\frac{28}{4}$	$\frac{56}{8}$	$\frac{70}{2}$	$\frac{56}{8}$	$\frac{28}{4}$	$\frac{8}{8}$	-	-	-	-
			$\frac{13^x}{1}$		$\frac{13^x}{1}$						
12	$\frac{12}{12}$	$\frac{66}{6}$	$\frac{220}{4}$	$\frac{495}{3}$	$\frac{792}{12}$	$\frac{924}{2}$	$\frac{792}{12}$	$\frac{495}{3}$	$\frac{220}{4}$	$\frac{66}{6}$	$\frac{12}{12}$
					$\frac{12^x}{1}$		$\frac{12^x}{1}$				

x - для приближенных расчетов.

xx - номера вариантов соответствуют количеству выключаемых цилиндров.

Продолжение таблицы 2

II

Число цилиндров двигателя	Вероятность того, что каждый цилиндр двигателя может быть в данном сочетании в выключенном состоянии											
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II ^{xx}	
2	0,5	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	I/3	2/3	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	I/4	I/2	3/4	I	-	-	-	-	-	-	-	-
6	I/6	I/3	I/2	2/3	5/5	I	-	-	-	-	-	-
8	I/8	I/4	3/8	I/2	5/8	3/4	7/8	I	-	-	-	-
12	I/12	I/6	I/4	I/3	5/12	I/2	7/12	2/3	3/4	5/6	II/I2	-

xx - номера вариантов соответствуют количеству выключенных цилиндров.

Число цилиндров двигателя	Номинальная степень догрузки при выключении цилиндров с использованием догрузочных устройств									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	26,5 - 35,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	51,0 - 57,3	2,0 - 14,5	-	-	-	-	-	-	-	-
4	63,2 - 67,9	26,3 - 35,9	перегрузка	-	-	-	-	-	-	-
6	75,5 - 78,6	51,0 - 57,2	26,5 - 35,9	2,0 - 14,5	не работает	-	-	-	-	-
8	81,6 - 84,0	63,2 - 67,9	44,7 - 51,9	26,5 - 35,9	7,9 - 19,9	перегрузка	не работает	-	-	-
12	87,8 - 89,3	75,5 - 78,6	63,3 - 67,9	51,0 - 57,3	38,8 - 46,4	26,5 - 35,9	14,3 - 25,2	2,0 - 14,5	перегрузка	не работает

xx - номера вариантов соответствуют количеству выключенных цилиндров.

Сравнивая различные варианты сочетаний по критерию требуемой величины догрузки, находим, что лучшими являются те, у которых выключенные цилиндры составляют больше половины. Однако использование этих вариантов при диагностике двигателя создает определенные трудности. Количество выключенных цилиндров больше, чем работающих. Чтобы получить завершённый цикл испытаний с одинаковым для каждого цилиндра количеством состояний "в работе" и "выключено", нужно увеличить количество испытаний. Цикл испытаний затягивается по времени, варианты сочетаний теряют ценность. Тем не менее для полевых проверок без тормозных установок они незаменимы.

Одним из существенных недостатков всех вариантов сочетаний, если они применяются раздельно друг от друга, является то, что эффективную мощность двигателя невозможно определить без знания мощности механических потерь. Это видно из обобщенной, полученной нами для парциальных испытаний формулы /6/:

$$N_e = A \left(\sum_1^K N_{z-z_e}^k + B N_m \right) \quad / 6 /$$

где А и В - постоянные коэффициенты, зависящие от количества работающих и выключенных цилиндров;

$N_{z-z_e}^k$ - мощность догрузки при работе двигателя с частью выключенных цилиндров;

К - количество догрузок при осуществлении полного цикла испытаний;

N_m - мощность механических потерь двигателя.

Формула /6/ для каждого выбранного сочетания принимает конкретный, удобный для расчетов вид. Например, для 6-цилиндрового двигателя, работающего с двумя выключенными цилиндрами, она после определения А и В примет вид:

$$N_e = 0,5 / N_{z-2}^I + N_{z-2}^{II} + N_{z-2}^{III} + N_m /, \quad / 7 /$$

где А и В получены из соотношения:

$$\frac{z_e}{z_p} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}.$$

Таблица 3

Варианты сочетаний, удовлетворяющих условию более равномерной работы двигателя

Порядок работы в цилинд- рах дви- гателя	Варианты сочетаний								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-2	X								
I-3-2	X								
I-3-4-2	X								
I-5-3- -6-2-4	X				X				
I-5-4- -2-6-3- -7-8	X								
I-6п-5л- 2л-3л-4л- 6л-1л-2л- 5л-4л-3л	X								

X - лучших вариантов нет; IX - номера вариантов соответствуют количеству выключаемых цилиндров.

A - обратная величина полученного знаменателя, $A = -\frac{I}{2}$; B равно получившемуся числителю, $B = I$. При работе этого же двигателя на двух цилиндрах формула /6/ выглядит следующим образом:

$$N_e = N_{z-y}' + N_{z-y}'' + N_{z-y}''' + 2N_m \quad /8/$$

где A и B получены из соотношения:

$$\frac{Z_e}{Z_p} = \frac{4}{2} = \frac{2}{1}; \quad A = \frac{I}{I}; \quad B = 2.$$

Коэффициенты A и B находим изложенным в примерах методом для всех случаев сочетаний работающих и выключенных цилиндров.

В связи с тем, что не всегда для двигателя известна мощность механических потерь, целесообразно варианты сочетаний комбинировать /совмещать/ друг с другом. Суммарное количество комбинаций сочетаний должно быть достаточным для решения получающейся системы уравнений относительно эффективной мощности двигателя. Наиболее простые совмещения сочетаний:

$$1 - Z_p = 0,5 Z \longleftrightarrow Z_p = 0,5 Z - I;$$

2 - $Z_p = 0,5 Z \longleftrightarrow Z_p = 0,5 Z + I$ /двухсторонняя стрелка указывает, что данные сочетания совмещаются/. Максимально потребная величина догрузочной мощности определяется в первом случае совмещений догрузкой при $Z_p = 0,5 Z$, а во втором - при $Z_p = 0,5 Z + I$. Другие варианты менее практичны, т.к. при их использовании количество испытаний увеличивается, время проверки растет, экономичность диагностики снижается. Рассмотрим указанные варианты совмещений сочетаний для некоторых двигателей.

1. При диагностике 4-цилиндрового двигателя совмещением указанных сочетаний мощностные показатели определяются следующим образом:

$$N_e = N_{z-1}' + N_{z-1}'' - N_{z/2}' \quad /9/$$

Эта формула выводится на основании решения системы уравнений баланса мощности при работе дви-

гателя на двух $1\bar{z}_p = 0,5\bar{z}$ /и трех $1\bar{z}_p = 0,5\bar{z} + 1$ / цилиндрах. Эта же система уравнений позволяет определять индикаторную мощность двигателя и его цилиндров.

При этом возможны два варианта:

$$N_i = 4N_e - (N'_{z-1} + N''_{z-1} + N'''_{z-1} + N''''_{z-1}) ; \quad / \text{ IO } /$$

$$N_i = 2N_e - (N'_{z/2} + N''_{z/2}) . \quad / \text{ II } /$$

Определив N_e и N_i , нетрудно подсчитать и остальные мощностные показатели двигателя.

Индикаторная мощность отдельных цилиндров подсчитывается как разность догрузок при работе двигателя на 3 и 2 цилиндрах.

$$N_{ij} = N'_{z-1} - N'_{z-2} . \quad / \text{ I2 } /$$

Эффективная мощность отдельных цилиндров равна:

$$N_{ej} = N_{ij} \cdot \eta_m . \quad / \text{ I3 } /$$

2. При диагностике 6-цилиндрового двигателя по первому варианту $1\bar{z}_p = 0,5\bar{z} \longleftrightarrow \bar{z}_p = 0,5\bar{z} - 1$:

$$N_e = 2(N'_{z/2} + N''_{z/2}) - (N'_{z-y} + N''_{z-y} + N'''_{z-y}) ; \quad / \text{ I4 } /$$

$$N_i = 3(N'_{z/2} + N''_{z/2}) - 2(N'_{z-y} + N''_{z-y} + N'''_{z-y}) . \quad / \text{ I5 } /$$

а по второму варианту совмещений $1\bar{z}_p = 0,5\bar{z} \longleftrightarrow \bar{z}_p = 0,5\bar{z} + 1$:

$$N_e = (N'_{z-2} + N''_{z-2} + N'''_{z-2}) - (N'_{z/2} + N''_{z/2}) ; \quad / \text{ I6 } /$$

$$N_i = 2(N'_{z-2} + N''_{z-2} + N'''_{z-2}) - 3(N'_{z/2} + N''_{z/2}) . \quad / \text{ I7 } /$$

Определение остальных мощностных показателей не вызывает трудностей. Индикаторная мощность отдельных цилиндров определяется по первому варианту,

как разность мощностей догрузок при работе двигателя на 3 и 2 цилиндрах, а по второму - как разность мощностей догрузок при работе на 4 и 3 цилиндрах.

3. При диагностике 8-цилиндрового двигателя для совмещения сочетаний $\tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} \leftrightarrow \tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} - 1$:

$$N_e = (3N'_{z/2} + 2N''_{z/2}) - (2N'_{z-5} + N''_{z-5} + N'''_{z-5}); \quad /18/$$

$$N_i = (5N'_{z/2} + 3N''_{z/2}) - (4N'_{z-5} + 2N''_{z-5} + 2N'''_{z-5}); \quad /19/$$

$$N_{ij} = N'_{z/2} - N'_{z-5} \quad /20/$$

а для совмещения сочетаний $\tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} \leftrightarrow \tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} + 1$:

$$N_e = (2N'_{z-3} + N''_{z-3} + N'''_{z-3}) - (2N'_{z/2} + N''_{z/2}); \quad /21/$$

$$N_i = (4N'_{z-3} + 2N''_{z-3} + N'''_{z-3}) - (2N'_{z/2} + N''_{z/2}); \quad /22/$$

$$N_{ij} = N'_{z-3} - N'_{z/2} \quad /23/$$

4. При диагностике 12-цилиндрового двигателя для совмещения сочетаний $\tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} \leftrightarrow \tilde{x}_p = 0,5\tilde{x} - 2$:

$$N_e = 2(N'_{z/2} + N''_{z/2}) - (N'_{z-8} + N''_{z-8} + N'''_{z-8}); \quad /24/$$

$$N_i = 3(N'_{z/2} + N''_{z/2}) - (2N'_{z-8} + N''_{z-8} + N'''_{z-8}). \quad /25/$$

Мощность догрузок во всех случаях определяется по показателям догрузочного устройства /тормоза, гидродогрузателя и др./ Другие диагностические показатели двигателя определяются одновременно с мощностными.

В.П.Соколов,
инженер-механик,
И.П.Терских,
канд.техн.наук

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛА ОБОРОТОВ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ПО ИМПУЛЬСАМ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

Обороты коленчатого вала двигателя - важный диагностический параметр. По ним оценивают рабо-