

воздуховоды можно устанавливать на бетонированном полу картофелехранилища на любую сторону [2, 3].

Заключение

Улучшение параметров микроклимата по всему объему насыпи приведет к повышению сохранности картофеля, а также к снижению энергозатрат системы вентиляции картофелехранилища.

Список использованной литературы

1. Борычев, С.Н. Машинные технологии уборки картофеля с использованием усовершенствованных копателей, копателей-погрузчиков и комбайнов: дисс. докт. техн. наук. [Текст] / С.Н. Борычев – Рязань: РГСХА, 2008. - 29 с.

2. Колошеин Д.В. Лабораторные исследования процесса хранения картофеля в хозяйстве ООО «Подсосенки» Шацкого района Рязанской области // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2016. Т. 29. № 1. С. 71-74.

3. Колошеин, Д.В. Разработка устройства и обоснование параметров усовершенствованного воздуховода картофелехранилища [Текст] / Д.В. Колошеин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2017. – № 3. – С. 123-127.

4. Пшеченков К.А., Зейрук В.Н., Еланский С.Н., Мальцев С.В., Прямов С.Б. Хранение картофеля // М.:Агроспас, 2016. — 144 с.

УДК [629.114.02+631.3]

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ МТА

А.П. Ляхов , к.т.н., Г.И. Кошля, ст. преподаватель
*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Введение

При исследованиях динамики машинно-тракторных агрегатов (МТА) некоторые вопросы недостаточно проработаны теоретиче-

ски. Поэтому эффективный анализ явлений и предоставление их в количественной форме возможно в виде математической модели, которая является математическим отображением наиболее существенных сторон процесса. Однако решение большинства проблем невозможно без проведения эксперимента, который во многих случаях является весьма затратным и трудоёмким. В этом случае значимые возможности предоставляет теория планирования эксперимента с её статистическим характером эксперимента.

При этом большое значение имеет концепция оптимального использования области варьирования условий эксперимента с целью построения математической модели. При построении модели постулируется ее вид, проводится эксперимент в нескольких точках, по полученным результатам рассчитываются оценки неизвестных параметров модели.

Анализ показывает, что точность модели существенным образом зависит от условий проведения эксперимента и его план. Это означает, что с помощью планирования эксперимента, требуемая точность решения может быть достигнута при минимальном числе опытов и снижением затрат труда и средств, что повышает эффективность эксперимента.

Основная часть

При исследованиях динамики МТА некоторые звенья не имеют строго математического описания в связи с чем возникает необходимость их экспериментального определения. В этом случае имеют место трудности с проведением большого количества экспериментов при невысокой точности получаемых результатов. В настоящее время на большинстве современных тракторов устанавливаются дизельные двигатели с турбонаддувом при этом функциональные зависимости крутящего момента M от угловой скорости ω коленчатого вала двигателя, положения h рейки топливного насоса и давления воздуха p подаваемого в цилиндры турбокомпрессором не имеют строгого математического описания.

Предлагаемые способы решения этой проблемы базируются на экспериментально снятых данных и построении скоростных характеристик двигателя. Этот метод связан с большим объемом измерений и дает лишь графическое описание вышеназванной трехпараметровой характеристики, при невысокой точности и трудности

дальнейшего анализа полученных результатов. Попытка использования для описания результатов эксперимента алгебраического многочлена приводит к тому, что коэффициенты его являются статистически взаимосвязаны и не отражают степени влияния каждого параметра на величину крутящего момента. Указанные недостатки можно устранить используя теорию планирования эксперимента [1,2] при которой по совокупности независимых переменных (ω , h , p) строится план эксперимента, выбор которого зависит от цели исследования.

Анализ источников [3,4] показывает, что при исследованиях процессов двигателей внутреннего сгорания их характеристика, как правило, имеют выпуклый характер с одним экстремумом, что позволяет использовать композиционный план с построением квадратичной модели трехфакторной функции вида

$$M = \alpha_0 + \alpha_1\omega + \alpha_2h + \alpha_3p + \alpha_4\omega h + \alpha_5\omega p + \alpha_6hp + \alpha_7\omega^2 + \alpha_8h^2 + \alpha_9p^2 \quad (1)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_9$ – постоянные коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Для построения квадратичной модели (1) необходимо определить 10 коэффициентов, композиционный план должен включать 15 опытов.

В дальнейшем составление плана и обработки результатов опытов для нахождения коэффициентов по зависимости (1) проведем применительно к дизельному двигателю Д-238 НБ с турбонаддувом.

Проведем преобразование независимых переменных от натуральных значений к нормированным:

$$X_1 = \frac{\omega - \omega^*}{\Delta\omega}; \quad X_2 = \frac{h - h^*}{\Delta h}; \quad X_3 = \frac{P - P^*}{\Delta P}; \quad (1)$$

где ω^*, h^*, P^* – базовые (нулевые) уровни факторов;

$\Delta\omega, \Delta h, \Delta P$ – интервалы варьирования.

При свободном члене α_0 уравнения (1) вводим фиктивную пере-

менную X_0 и обозначим

$$X_0 = Z_0; \quad X_1 = Z_1; \quad X_3 = Z_3; \quad X_1X_2 = Z_4; \quad X_1X_3 = Z_5; \quad X_2X_3 = Z_6;$$

$$X_1^2 = Z_7; \quad X_2^2 = Z_8; \quad X_3^2 = Z_9.$$

С учетом принятой системы обозначений

$$M = \sum_{i=0}^9 \alpha_i Z_i \quad (2)$$

Для нахождения коэффициентов α_i принимаем ортогональный центральный композиционный план для трех независимых переменных, матрица которого представлена в таблице 1.

В данном плане реализуется полный факторный эксперимент в 8 точках на двух уровнях, одна центральная точка и шесть звездных точек. Свойство ортогональности плана позволяет получить однозначные и независимые значения искомым коэффициентов, при условии, что любые два столбца матрицы плана связаны условием

$$\sum_{q=i}^N Z_{qi} \cdot Z_{qj} = 0, \quad i \neq j$$

где q – номер строки матрицы плана;

N – число строк матрицы;

i, j – номера столбца.

В силу ортогональности плана для столбцов X_0 и X_i выполняется преобразование

$$\tilde{X}_{qi}^2 = X_{qi}^2 - \frac{\sum_{q=1}^N X_{qi}^2}{N}$$

Для столбцов X_i^2 и \tilde{X}_i^2 их значение определяется положением звездных точек на величине звездного плеча $\omega=1,215$.

Выявление границ факторного пространства (ω, h, p), выбор базовых (нулевых) уровней и интервалов варьирования проводились при, стендовых тормозных испытаниях двигателя Д-238НБ.

Наиболее сложными в динамическом отношении являются переходные процессы трогания и разгона МТА. В этом случае угловая частота коленчатого вала изменяется от ω_{cp} до ω_{max} , рейка топливного насоса находится в положении близком к номинальному режиму.

Поэтому базовые уровни независимых переменных принимаем: $\omega^* = 165 \text{ с}^{-1}$; $h^* = 12,7 \text{ мм}$; $\Delta\omega = 18,3 \text{ с}^{-1}$; $\Delta h = 0,75 \text{ мм}$.

На установившемся значении угловой скорости и соответствующем положении рейки топливного насоса диапазон давления нагнетаемого воздуха P составляет $1,192 \cdot 10^5$ и $1,382 \cdot 10^5$ Па.

По данным экспериментов при трогании и разгоне в силу инерционности системы нагнетания воздуха отстает от установившегося на $(0,10-0,16) \cdot 10^5 - 1,192 \cdot 10^5$ Па, следовательно в процессе эксперимента диапазон пониженных давлений составит $1,092 \cdot 10^5$ Па и базовое значение давления будет равно $P^* = 1,142 \cdot 10^5$ Па, шаг варьирования $\Delta p = 0,05 \cdot 10^5$ Па

При проведении эксперимента двигатель прогревали и педаль управления подачей топлива устанавливали в положение, соответствующее максимальным оборотам холостого хода. Затем постепенно увеличивали загрузку двигателя, плавно прикрывали заслонку подачи воздуха во всасывающей трубке турбокомпрессора, рейку топливного насоса выводили до упора в винт, ограничивающий заданную длину рейки.

При этом угловая скорость ω и давление P стабилизировались на необходимом уровне, после чего измеряли значение крутящего момента.

Так как на значение крутящего момента влияют такие случайные факторы как погрешности измерений, температуры и давление окружающей среды и другие, план эксперимента проводим трижды, а порядок проведения опытов в каждой повторности рандомизируем с использованием таблицы случайных чисел. Результаты опытов осредняем

$$M_q = \frac{\sum_{i=1}^m M_{qi}}{m}$$

где i - номер повторности;

m - число повторности.

Матрица планирования эксперимента приведены в таблице 1, оценка результатов, производится по параметрам регрессионного анализа. Гипотеза воспроизводимости оценивается по критерию Кохнера, оценка коэффициентов модели с использованием t-критерия Стьюдента.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

Матрица планирования эксперимента и расчет коэффициента уравнения													Результаты эксперимента								
g	Рандомизированный порядок реализации повторность l			X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	M ₁	M ₂	M ₃	\bar{M}	S _g ² , (10 Н·м) ²	M, (10 Н·м)	$\overline{(M - M)^2}$ (10 Н·м)	
	1-я	2-я	3-я	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	10 Н·м				(10 Н·м) ²	(10 Н·м)	(10 Н·м)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15						
1	12	5	7	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,2	+0,27	+0,27	63,5	61,0	60,5	61,7	2,58	61,09	0,37	
2	15	8	10	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	7	+0,27	+0,27	60,8	58,6	58,8	59,4	1,48	57,73	2,79	
3	1	1	2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,2	+0,27	+0,27	73,0	73,7	72,5	73,1	0,36	73,99	0,79	
4	3	3	4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	7	+0,27	+0,27	67,0	68,2	68,3	67,8	0,52	67,91	0,01	
5	14	7	9	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,2	+0,27	+0,27	66,3	63,4	63,5	64,4	1,19	64,79	0,15	
6	13	6	8	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	7	+0,27	+0,27	60,6	58,5	59,0	59,4	1,20	59,03	0,14	
7	2	2	3	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+0,2	+0,27	+0,27	79,5	78,0	78,3	78,6	0,63	78,82	0,05	
8	4	4	5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	7	+0,27	+0,27	70,3	71,4	72,0	71,2	0,74	70,34	0,74	
9	9	13	13	+1	-1,21	0	0	0	0	0	+0,2	-0,73	-0,73	73,3	70,6	70,3	71,4	2,73	70,12	1,64	
10	8	12	12	+1	+1,21	0	0	0	0	0	7	-0,73	-0,73	61,6	61,2	60,8	61,2	0,16	62,95	3,06	
11	5	9	6	+1	0	-1,21	0	0	0	0	+0,2	+0,75	-0,73	59,0	60,8	58,1	59,3	1,89	60,67	1,88	
12	6	10	1	+1	0	+1,21	0	0	0	0	7	+0,73	-0,73	76,0	76,7	75,1	76,2	0,19	75,37	0,69	
13	11	15	15	+1	0	0	-1,21	0	0	0	+0,2	-0,73	+0,75	67,3	66,4	66,4	66,7	0,27	67,02	0,10	
14	7	11	11	+1	0	0	+1,21	0	0	0	7	-0,73	+0,75	70,9	71,3	70,5	70,9	0,16	70,70	0,04	
15	10	14	14	+1	0	0	0	0	0	0	+0,2	-0,73	-0,73	70,1	71,0	70,4	70,5	0,23	68,86	2,69	
$\sum_{g=1}^{15} S_{g_i}^2$				15	10,95	10,95	10,95	8	8	8	4,37	4,37	4,37	Проверка воспроизводимости				Проверка воспроизводимости			
$\sum_{g=1}^{15} S_{g_i}^2 \bar{M}_{g_i}$				1011,4	-32,4	+66,3	+16,7	-5,4	-4,8	+2,2	-6,9	-2,5	+0,57	$\sum_{g=1}^{15} S_g^2 = 15,04$				$\sum_{g=1}^{15} (\bar{M} - M)^2 = 15,14;$			

											$S^2\{\bar{M}\} = \frac{\sum S_i^2}{15} = 1,0$	$S_{an}^2 = 2,523$
α_1	67,4 2	-2,96	+6,05	+1,53	- 0,68	- 0,60	+0,2 8	-1,58	-0,57	+0,13	$G_{max} = 0,182$	$F = 2,523$
$S^2\{a_i\}$	0,02 2	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,076	0,076	0,076	$q = 5\%$	$\frac{1}{2} q = 2,5\%$
$S\{a_i\}$	0,15	0,17	0,17	0,17	0,2	0,2	0,2	0,28	0,28	0,28	$V_{1B} = m - 1 = 2;$ $V_{2B} = N = 15$	$V_{1дл} = N - d = 6;$ $V_{2дл} = N(m - 1) = 30$
t_i	449, 5	17,41	35,59	9,0	3,4	3,0	1,14	5,64	2,048	0,46	$G_{сп} = 0,334$ $G > G_{max}$	$F_{сп} = 2,866 > F$
$V_{3и} = 30;$ $\frac{1}{2} q = 2,5\%$ $t_{сп} = 2,042$											дисперсии однородны	описание адекватно

В результате получили полиномиальную зависимость вида

$$M = 68,86 - 2,96X_1 + 6,05X_2 + 1,53X_3 - 0,68X_1X_2 - 0,60X_1X_3 + 0,28X_2X_3 + 1,58X_1^2 + 0,57X_2^2 + 0,13X_3^2 \quad (3)$$

где $X_1 = \frac{\omega - 165}{18,3}$; $X_2 = \frac{h - 12,7}{0,75}$; $X_3 = \frac{P - 1,142}{0,05}$.

Последний член уравнения (3) оказался незначимым и его можно не учитывать без пересчета значений остальных коэффициентов.

По уравнению (3) получили значение крутящего момента в экспериментальных точках и определяем дисперсию адекватности. По F-критерий Фишера оцениваем однородность дисперсий адекватности и дисперсии воспроизводимости и если их отношение меньше табличного делаем заключение о адекватности уравнения (3).

Дополнительная проверка производилась путем сравнения результатов по уравнению (3) с экспериментальными замерами крутящего момента по внешней скоростной характеристике, построенной по данным испытаний двигателя на тормозном стенде (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные результаты теоретических и экспериментальных данных

№ п.п	ω , 1/с	h, мм	p, 10 ⁵ Па	M ₁	M ₂	\bar{M}	S ² (10 Н·м) ²	M (10 Н·м) ²	(M - M) (10 Н·м) ²
				10 Н·м					
1	199	7,55	1,070	2,68	2,68	2,68	0	0,72	3,63
2	191	9,22	1,129	27,3	23,3	24,8	4,5	25,15	0,15
3	190	10,45	1,182	38,7	41,0	39,9	2,42	41,74	3,38
4	186	12,19	1,268	60,0	58,0	54,0	2,00	61,57	6,60
5	185	12,82	1,348	67,0	70,6	68,8	6,48	68,18	0,40
6	184	13,60	1,409	77,2	75,2	76,5	2,00	76,70	0,25
7	183	13,77	1,420	79,0	80,0	79,5	0,50	78,30	1,44
8	181	13,74	1,409	80,0	81,3	80,6	0,84	78,97	2,82
9	179	13,80	1,397	80,0	82,4	81,2	2,88	79,74	2,13
10	175	13,75	1,395	80,0	81,0	80,5	0,50	81,60	1,21
11	170	13,75	1,343	82,7	83,3	83,0	0,98	81,94	1,12
12	152	13,85	1,285	84,2	85,8	85,0	1,28	85,66	0,44
13	131	14,50	1,262	89,8	90,8	90,3	0,50	91,44	1,28

$\sum S^2 = 24,79$ $\sum (\bar{M} - M)^2 = 24,82$
$S^2\{\bar{M}\} = \frac{\sum S^2}{13} = 1,91;$ $S_{зд}^2 = \frac{1}{N} \sum (\bar{M} - M)^2 = 1,91;$
$F = \frac{S_{зд}^2}{S^2\{M\}} = 1,0;$
$\frac{1}{2}q = 2,5\%;$ $v_{1зд} = N - v = 4;$ $v_{2зд} = N(m - 1) = 13$
$F_{кр} = 3,995 > F$ Описание адекватности

Заключение

По результатам измерений крутящего момента в 15 точках факторного пространства (ω , h , p) получена полиномиальная зависимость и найдены ее коэффициенты по определению крутящего момента двигателя ЯМЗ-238НБ в широком диапазоне измерения независимых факторов ω , h , p .

Композиционной симметричной двухуровневый ортогональный план позволил получить квадратичную модель и полиномиальную аппроксимирующую зависимость при минимальном числе опытов.

Полученная зависимость адекватна в факторном пространстве, что подтверждается регрессионным анализом. Применяемый математический аппарат достаточно простой, что позволяет его использовать при решении многих задач при исследованиях машинно-тракторных агрегатов.

Список использованной литературы

1. Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976г. - 276с.
2. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов. - М.: Мир, 1977.
3. Борский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора. М., «Машиностроение» 1973. - 279с.
4. Ленин И.М., Попык К.Г. и др. Автомобильные и тракторные двигатели. Под ред. проф. Ленина И.М. М. «Высшая школа», 1969, 655с.