

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.9Т

А.А. Багаев,
Р.С. Чернусь

УРАВНЕНИЕ РЕГРЕССИИ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: центробежный расходомер, передаточная функция, численный эксперимент, уравнение регрессии, переходный процесс, дифференцирование, критерий Фишера.

Введение

Перспективным средством измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных материалов является центробежный расходомер при условии повышения его точности [1]. Повышение точности возможно путем оптимизации переходных процессов.

Одним из основных методов исследования качества переходных процессов центробежного расходомера являются построение и анализ передаточной функции, исследование которой позволяет получить частотные характеристики.

Получена оригинальная передаточная функция центробежного расходомера, связывающая параметры электродвигателя, рабочего органа и сыпучего продукта [2]:

$$W(p) = - \frac{\left(\frac{\partial M_c}{\partial Q}\right)_0 \frac{Q_0}{\omega_{10}} i (T_3 p + 1)}{J_\Sigma i T_3 p^2 + \left(J_\Sigma i + \frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} T_3\right) p + \frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} + \beta i}, \quad (1)$$

где M_c – момент сопротивления;

Q – расход материала;

ω_2 – угловая скорость крыльчатки;

J_Σ – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя;

ω_1 – угловая скорость вращения вала двигателя;

$i = \frac{\Delta \omega_1}{\Delta \omega_2}$ – передаточное число редуктора;

тора;

$\Delta \omega_{10} Q_0$ – некоторые постоянные, в качестве которых можно использовать, например, номинальные значения скорости ротора двигателя и производительности расходомера;

T_3 – электромагнитная постоянная времени;

β – жесткость механической характеристики.

При анализе передаточной функции основной проблемой является нахождение частных производных момента сопротивления M_c по расходу Q и угловой скорости крыльчатки ω_2 , т.е. $\frac{\partial M_c}{\partial Q}$ и $\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2}$. Зависимость момента сопротивления от расхода и угловой скорости получена в работе [1]:

$$M_{об} = Q \left[\left(R - \frac{\sqrt{2gh} \alpha_{заб}}{2\omega_2} \right) \sqrt{2gh + \vec{V}_N^{/abc^2} + \vec{V}_\tau^{/abc^2} - 2\sqrt{2gh(\vec{V}_N^{/abc^2} + \vec{V}_\tau^{/abc^2})} \cos(90 - \arctg \frac{\vec{V}_\tau^{/abc}}{\vec{V}_N^{/abc}} - \varphi)} \times \right. \\ \left. \times \cos(\alpha_n + \arctg \frac{\vec{V}_\tau^{/abc}}{\vec{V}_N^{/abc}} - \arcsin \frac{\sqrt{2gh} \sin \varphi}{\sqrt{2gh + \vec{V}_N^{/abc^2} + \vec{V}_\tau^{/abc^2} - 2\sqrt{2gh(\vec{V}_N^{/abc^2} + \vec{V}_\tau^{/abc^2})} \cos(90 - \arctg \frac{\vec{V}_\tau^{/abc}}{\vec{V}_N^{/abc}} - \varphi)}}} \right) + \\ \left. + R \left(\left(\sqrt{\frac{1}{8} f_1^2 gh \alpha_{заб}^2 + \omega_2^2 R^2} - \frac{1}{4} f_1 \sqrt{2gh} \alpha_{заб} \right) \sin \alpha_n + \omega_2 R \right) \right] , \quad (2)$$

где R – радиус турбинки, $R \geq H = Q / L\rho\sqrt{2gh}$;

g – ускорение свободного падения;

h – высота падения частиц сыпучего материала;

$\alpha_{заб}$ – угол забора материала;

φ – угол между вектором \vec{U} и лопастью;

α_n – угол изгиба лопасти турбинки относительно радиального направления;

f_1, ε – коэффициенты трения скольжения и восстановления частиц соответственно.

Нормальная составляющая скорости:

$$\vec{V}_N^{/abc} = \omega R \cos \alpha_n (1 + \varepsilon) + \sqrt{2gh} \sin \varphi \varepsilon ; \quad (3)$$

тангенциальная составляющая скорости:

$$\vec{V}_\tau^{/abc} = \sqrt{2gh} \cdot \cos \varphi - \left\{ f_1 \left[\left(\sin \varphi - \frac{\omega R}{\sqrt{2gh}} \cdot \cos \alpha_n \right) - \left(\sin \varphi - \frac{\omega R}{\sqrt{2gh}} \cdot \cos \alpha_n \right) \varepsilon \right] \times \right. \\ \left. \cos \varphi - \frac{\omega R}{\sqrt{2gh}} \cdot \sin \alpha_n \right. \\ \left. \times \frac{1}{\sqrt{\left(\cos \varphi - \frac{\omega R}{\sqrt{2gh}} \cdot \sin \alpha_n \right)^2 + \left(\sin \varphi - \frac{\omega R}{\sqrt{2gh}} \cdot \cos \alpha_n \right)^2}} \right\} . \quad (4)$$

Выражение (2) с учетом (3) и (4) является иррациональным, трансцендентным и сложным для дифференцирования и, следовательно, для использования в передаточной функции.

В связи с этим **целью** работы является получение уравнения, описывающего зависимость момента сопротивления M_c от пяти основных факторов: угловой скорости крыльчатки ω_2 (переменная X_1) расхода материала Q (X_2), угла изгиба лопасти турбинки относительно радиального направления α_n (X_3), коэффициентов трения скольжения f_1 (X_4), и восстановления частиц ε (X_5), удобного для дифференцирования.

Для этого целесообразно получить выражение (2) в виде уравнения регрессии второго порядка путем проведения численного эксперимента, в котором факторы должны варьироваться не менее чем на трех уровнях [3]. Для проведения полного факторного эксперимента 3^5 , в котором каждый из факторов меняется на трех уровнях, необходимо провести

59049 измерений. Их можно уменьшить до 27, взяв за основу близкий к D-оптимальному план Хартли [4]. Интервалы варьирования переменных и матрица планирования эксперимента приведены в таблице. План реализован в среде Excel в соответствии с формулой (2). Результаты расчетов сведены в таблицу.

По результатам расчетов, проведенных в соответствии с матрицей планирования, определены коэффициенты регрессии уравнения, описывающего поверхность отклика на локальном участке вблизи выбранного основного уровня, по формулам:

$$b_0 = 0,13804 \sum_{n=1}^N y_n - 0,0303 \sum_{i=1}^p \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n ; \quad (5)$$

$$b_{ii} = -0,0303 \sum_{n=1}^N y_n + 0,5 \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n - \\ - 0,09091 \sum_{i=1}^p \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n ; \quad (6)$$

Матрица планирования, уровни варьирования факторов, результаты численного эксперимента и расчета по уравнению регрессии

Обозначения	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y	Y _p	(Y-Y _p) ²
Уровни								
верхний (x ₁₊)	105	500	45	0,4	0,6			
основной (x ₁₀)	63	275	32,5	0,25	0,45			
нижний (x ₁₋)	21	50	20	0,1	0,3			
№ опыта								
1	+	+	+	+	+	353	356,5	12,25
2	-	-	+	+	+	3,6	4,1	0,25
3	+	+	-	-	-	58	56,9	1,21
4	+	-	-	-	-	20	20,7	0,49
5	-	+	-	+	+	58,5	59,9	1,96
6	+	-	-	+	+	20,5	24,3	14,44
7	+	+	+	-	-	349	352,9	15,21
8	-	-	+	-	-	3,8	0,5	10,89
9	-	+	+	+	-	68	67,7	0,09
10	+	-	+	+	-	26	28,1	4,41
11	+	+	-	-	+	299	305	36
12	-	-	-	-	+	2,8	-0,5	10,89
13	-	+	+	-	+	6,4	64,1	0,01
14	+	-	+	-	+	22,3	24,5	4,84
15	+	+	-	+	-	313	311,5	2,25
16	-	-	-	+	-	2,8	3,1	0,09
17	0	0	0	0	0	137	136,9	0,01
18	+	0	0	0	0	219,2	218,9	0,09
19	-	0	0	0	0	43,6	58,3	22,09
20	0	+	0	0	0	207,3	202,5	23,04
21	0	-	0	0	0	13,5	18,5	25
22	0	0	+	0	0	142,6	144,1	2,25
23	0	0	-	0	0	128,6	129,7	1,21
24	0	0	0	+	0	139,6	138,7	0,01
25	0	0	0	-	0	134,4	135,1	0,49
26	0	0	0	0	+	136,1	136,9	0,64
27	0	0	0	0	-	137,8	136,9	0,81
Σ						3104		190,8

$$b_i = 0,0556 \sum_{n=1}^N x_{in} y_n ; \quad (7)$$

$$b_{ij} = 0,0625 \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n , \quad (8)$$

где x_{in}, x_{jn} – значения i-того и j-того факторов в n-ном опыте;

p – число факторов;

N – количество экспериментов;

y_n – значение параметра оптимизации в том же опыте [5].

В результате получим коэффициенты уравнения регрессии: b₀ = 136,9;

b₁ = 73,2; b₂ = 92; b₃ = 7,2; b₄ = 1,8; b₅ = -1; b₁₂ = 61,9; b₁₃ = 5; b₁₄ = 1,1; b₁₅ = -0,6; b₂₃ = 6; b₂₄ = 1,2; b₂₅ = -0,6; b₃₄ = -0,2; b₃₅ = 0,6; b₄₅ = 4,3; b₁₁ = -5,4; b₂₂ = -26,4; b₃₃ = -1,3; b₄₄ = 0,2; b₅₅ = 0,1.

Проверим существенность коэффициентов регрессии. Критическое значение коэффициента равно:

$$[b] = 0,01 b_{max} = 0,01 * 136,9 = 1,369. \quad (9)$$

Тогда коэффициенты b_i < [b] незначимы [6]. Значит, незначимы коэффициенты b₅, b₃₃, b₄₄, b₅₅, b₁₄, b₁₅, b₂₄, b₂₅, b₃₄, b₃₅.

Уравнение регрессии примет вид:

$$y = 136,9 + 73,2x_1 + 92x_2 + 7,2x_3 + 1,8x_4 + 61,9x_1x_2 + 5x_1x_3 + 6x_2x_3 + 4,3x_4x_5 - 5,4x_1^2 - 26,4x_2^2. \quad (10)$$

Для проверки адекватности представления результатов численного эксперимента полиномом второй степени определяем расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (11)$$

где S_y^2 – дисперсия ошибки эксперимента (в нашем случае может быть принята 5% от b_0) $S_y^2 = 0,05 \cdot b_0 = 6,8$ [7];

S_{LF}^2 – дисперсия неадекватности математической модели:

$$S_{LF}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (y_n - y_{pn})^2}{N - k} = \frac{190,8}{27 - 11} = 11,9, \quad (12)$$

$$M = 15,6 + 0,005\omega + 0,211Q - 0,6\alpha_n - 74\varepsilon - 47,78f_1 + 0,0066\omega Q + 0,0095\omega\alpha_n + 0,0021Q\alpha_n + 191,11f_1\varepsilon - 0,00306\omega^2 - 0,00052Q^2. \quad (14)$$

Поверхность отклика зависимости M от ω и Q при фиксированных на среднем уровне переменных α, ε, f показана на рисунке.

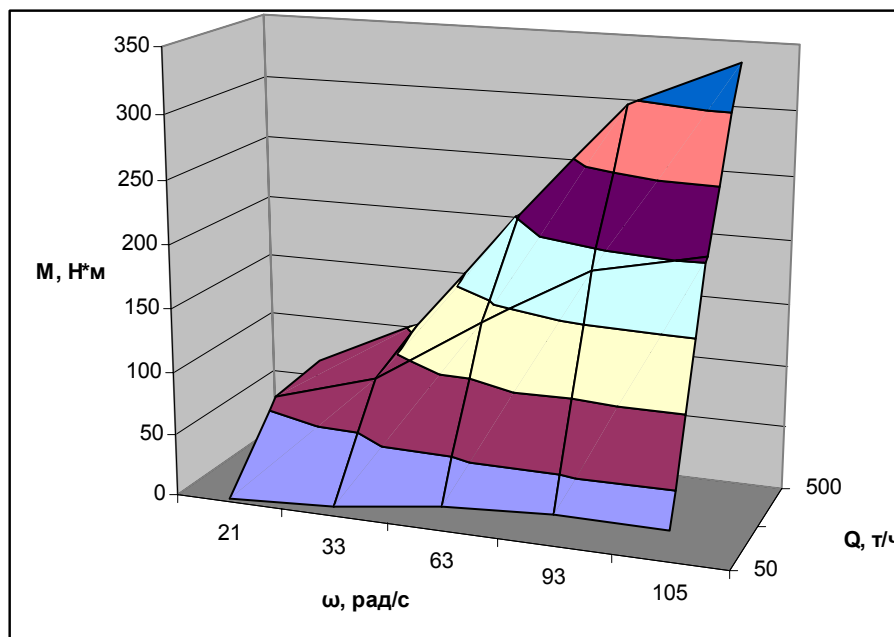


Рис. Зависимость изменения момента сопротивления M от угловой скорости крыльчатки ω и расхода материала Q при $\alpha = 32,5^\circ, \varepsilon = 0,25, f_1 = 0,45$

Выводы

Получено удобное для дифференцирования уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость момента сопротивления от угловой скорости крыльчатки ω , расхода материала Q , угла изгиба лопасти турбинки относительно ради-

где y_{pn} – расчетное значение параметра оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии;

$k = 11$ – количество коэффициентов регрессии.

$$F_p = \frac{11,9}{6,8} = 1,75.$$

Табличное значение критерия при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы $\nu_1 = N - p - 1 = 21$ $\nu_2 = N - 1 = 26$ равно $F_T = 1,99$.

Так как $F_p < F_T$, то можно сделать вывод об адекватности модели [4].

Раскодируем модель по формуле:

$$X_i = \frac{(x_i - x_{0i}) \cdot 2}{x_{+i} - x_{-i}}. \quad (13)$$

Тогда уравнение (10) примет вид:

ального направления α_n , коэффициентов трения скольжения f_1 и восстановления частиц ε , которое можно использовать для исследования частотных характеристик передаточной функции центробежного расходомера.

Библиографический список

1. Багаев А.А. Использование момента Кориолисовых сил для измерения массового расхода потока зерна и продуктов его размола / А.А. Багаев, В.Г. Лукьянов, Р.С. Чернущ // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 4 (42). – С. 47-49.

2. Багаев А.А. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов / А.А. Багаев, В.Г. Лукьянов, Р.С. Чернущ // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 71-75.

3. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий,

И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

5. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

6. Федоренко И.Я. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры / И.Я. Федоренко. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2003. – 282 с.

7. Веников В.А. Теория подобия и моделирования: учебник для вузов / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.



УДК 631.171.631.365.3.631.2

В.Н. Капустин

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЗАИМОСВЯЗИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ
РАСХОДОМ ВОЗДУХА В ШАХТЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

Ключевые слова: вентиляция естественная, регулятор расхода воздуха, помещение животноводческое.

Обеспечение нормируемого кислородного режима в животноводческом помещении является одной из основных задач, решаемой системами вентиляции. При этом в зимний период допускается кратковременное отклонение от нормативов температуры и относительной влажности воздуха [1]. Минимально достаточный воздухообмен в животноводческом помещении, оборудованном естественной системой вентиляции, ручным регулированием выдержать практически невозможно, т.к. расход воздуха зависит как от разности температур внутри и снаружи помещения, так и от скорости ветра. При проектировании систем естественной вентиляции за расчетную температуру наружного воздуха принимается -8°C . При дальнейшем понижении температуры наружного воздуха предполагается снизить производительность приточных и вытяж-

ных устройств посредством установленных в них регулирующих элементов – клапанов или шиберов, т.е. увеличить сопротивление [2].

Изменение перепада давлений внутри и снаружи помещения обусловлено изменением температуры наружного воздуха и достаточно точно прогнозируемо по данным метеосводок. Изменение перепада давлений в зависимости от направления скорости ветра прогнозировать сложно, а эти параметры влияют на систему в целом и на каждое устройство в отдельности, соответственно, происходит рассогласование в режиме их работы.

Некоторые из вытяжных устройств работают как приточные, другие приточные – как вытяжные. Часто происходит так называемое «опрокидывание» режима работы, которое ведет к ухудшению всех параметров микроклимата, что недопустимо. Особенно тяжелые последствия возникают при «опрокидывании» режима работы шахт естественной вытяжки.