

Д. В. ЗУЙКОВ, А. Е. КРУПИН

ОТСЕИВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ключевые слова: износостойкость, нож, рабочий орган, уровень варьирования, эксперимент, фактор.

Аннотация. В статье рассмотрены основные способы выбора факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на отклик. Указаны недостатки и преимущества существующих способов отсеивания факторов и дано обоснование выбора наиболее подходящего для конкретных условий эксперимента. Приведен алгоритм планирования эксперимента и представлены его результаты.

Целью представленной работы является достоверное выделение существенных факторов при минимальных затратах труда, времени и средств. При этом решаются следующие задачи:

- поиск наиболее распространенных планов отсеивающих экспериментов;
- выявление преимуществ и недостатков существующих методов отсеивания факторов;
- исключение наименее пригодных методов отсеивания факторов для конкретных условий планирования эксперимента;
- выбор наиболее приемлемого способа отсеивания факторов (по минимуму затрат времени и средств, по достоверности получаемых данных, по простоте осуществления отсеивания);
- построение плана эксперимента и его проведение;
- расчет коэффициентов регрессии и их доверительного интервала.

Конечной целью эксперимента в основном является определение оптимальных значений факторов при экстремальном (минимальном или максимальном) значении отклика. Для правильного отображения объекта необходимо, чтобы его математическая модель включала все существенно влияющие на отклик факторы.

Отсутствие существенных факторов в модели не позволит дать точную оценку явлениям, протекающим в объекте, что, в свою очередь, повлечет возникновение ошибок в решениях, принимаемых с помощью модели. К примеру, найденное оптимальное значение исследуемого отклика окажется значительно удаленным от действительного. Модели, включающие в себя не все существенные факторы, как правило, являются неадекватными. Для того чтобы модель включала только доминирующие факторы, применяют отсеивающие эксперименты.

Главной задачей составления математической модели отсеивающего объекта является выделение с помощью специальных методов значимых факторов и отсеивание факторов несущественно влияющих на выходной параметр при минимальном количестве экспериментов, но с обеспечением достоверности полученных результатов.

Обычные методы математического моделирования зачастую направлены на тщательное изучение поверхности отклика и при большом числе переменных оказываются неприемлемыми вследствие большого количества опытов и высоких затрат времени. Поэтому существуют специальные методы выделения доминирующих факторов на «шумовом фоне» всех остальных, которые называются отсеивающими экспериментами.

Основными методами, направленными на снижение затрат вычислительного времени и на уменьшение количества проводимых экспериментов на основании литературных источников [1, с. 152; 2, с. 145; 3, с. 28; 4, с. 172; 5, с. 111; 6, с. 315; 7, с. 88; 9, 481], являются:

- 1) дисперсионный анализ;
- 2) насыщенные планы дробного факторного эксперимента;
- 3) планы Плакетта–Бермана;
- 4) метод случайного баланса;
- 5) ранговая оценка факторов;
- 6) корреляционный анализ;
- 7) последовательное отсеивание.

1. Дисперсионный анализ основан на линейной математической модели, недостатком которой является проведение большого количества необходимых опытов, что вызывает большие затраты времени [9, с. 209, 258].

2. Особенностью применения насыщенного планирования является то, что доминирующими должны быть линейные эффекты. Недостатком является то, что соблюдение данного условия не всегда можно проверить до проведения экспериментов [9, с. 231].

3. Характерной особенностью планов Плакетта–Бермана является то, что их результаты легко поддаются обработке, а линейные эффекты рассчитываются независимо друг от друга [9, с. 259]. Данные планы являются оптимальными с точки зрения минимизации наибольшей дисперсии среди всех дисперсий оценок коэффициентов регрессии. Планы являются ортогональными и нормированными, благодаря чему их результаты легко обрабатываются [7, с. 184].

4. Особенности метода случайного баланса заключаются в том, что он применим для большого числа факторов; обладает невысокой чувствительностью; применим, когда заведомо известно, что число значимых факторов гораздо меньше, чем число факторов, взятых под подозрение [9, с. 209, 259].

5. Ранговая оценка (априорное ранжирование или психологический эксперимент), по мнению источников [2, с. 35], [3, с. 29], [5, с. 53], [9, с. 260], зачастую дает субъективные результаты, к тому же влечет за собой трудоемкие и громоздкие расчеты.

6. Корреляционный анализ применяется для оценки взаимосвязи между факторами. Недостатком является то, что исследуемые величины должны распределяться по нормальному закону, а также метод может характеризовать только линейную связь между переменными [3, с. 46].

7. Последовательное отсеивание применяется в основном при большом количестве факторов [2, с. 264].

На основании анализа преимуществ и недостатков существующих методов выделения существенных факторов предлагается применять план Плакетта–Бермана, характеризующийся достаточно низкой трудоемкостью и высокой точностью наряду с небольшим количеством необходимых опытов.

При упрочнении режущих элементов уборочных сельскохозяйственных машин путем нанесения на их поверхности хромового гальванического покрытия возникает вопрос о получении слоя с максимальной стойкостью к изнашиванию.

Для того чтобы получить износостойкое покрытие с оптимальными качествами, нужно определить, каким образом на свойства покрытия влияют различные факторы.

Проведя ряд опытов в лабораторных условиях на установке для исследования износостойкости рабочих органов уборочных машин [8], и на основании литературы с информацией по данному направлению исследований предлагается определить влияние семи факторов на износостойкость режущих элементов уборочных машин. Исследова-

ния величины износа образцов производились на машине трения горизонтального типа 77 – МТ1 ГОСТ 10198-78 (рис. 1).



Рисунок 1 – Машина трения горизонтального типа 77-МТ1

Из ножей ротационной косилки были вырезаны образцы с размерами 5×8×25 мм (рис. 2).



Рисунок 2 – Образец ножа после исследований

Предварительно на ножи наносился слой хрома с различным сочетанием уровней варьирования факторов – всего 15 вариантов (табл. 1).

Таблица 1 – Планирование отсеивающего эксперимента [7, с. 188]

Фактор	А, мкм	Б, А/д м ²	В, °С	Г	Д, Ra	Е	Ж, H ₂ SO ₄ / CrO ₃	Фиктивные факторы				У, мг	
	Код	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆						x ₇
Основной уровень	20	55	60	–	35	–	1:125						
Интервал варьирования	15	25	10	–	15	–	1:25						
Нижний уровень (–)	5	30	50	нет	20	нет	1:100						
Верхний уровень (+)	35	80	70	есть	50	есть	1:150						
Опыт 1	+	+	–	+	+	+	–	–	–	+	–	–	350
2	–	+	+	–	+	+	+	–	–	–	–	+	401
3	+	–	+	+	–	+	+	+	–	–	–	–	370
4	–	+	–	+	+	–	+	+	+	–	–	–	434
5	–	–	+	–	+	+	–	+	+	+	–	–	446
6	–	–	–	+	–	+	+	–	+	+	+	+	458
7	+	–	–	–	+	–	+	+	–	+	+	+	416
8	+	+	–	–	–	+	–	+	+	–	–	+	352
9	+	+	+	–	–	–	+	–	+	+	–	–	316
10	–	+	+	+	–	–	–	+	–	+	+	+	399
11	+	–	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+	374
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	457
b _i	-35	-22	-13	-0,25	5,75	-1,6	1,4	5,1	-1,1	-0,25	2,25		

В специально изготовленной оправке образец закреплялся в неподвижном патроне машины и прижимался к брусу из белого электрокорунда 25АСМ2К20М ГОСТ 27595-88. Давление образца на брусок было постоянно и составляло 0,2 МПа. Через каждые 1000 циклов (двойных ходов) производился замер высоты образца микрометром МК-25 ГОСТ 6507-90 с точностью 0,01 мм и производилось взвешивание на весах ВЛР-200 ГОСТ 24104-80 с точностью 0,0001 г.

В качестве отклика взята величина износа образца, выраженная в изменении его массы, $g - Y$.

Факторы, из которых необходимо выделить наиболее существенные:

А – толщина наносимого слоя хрома, мкм;

Б – плотность тока на электродах, A/dm^2 ;

В – температура электролита в ванне, °С;

Г – термообработка до нанесения покрытия;

Д – шероховатость поверхности, Ra;

Е – термообработка после нанесения покрытия;

Ж – концентрация электролита.

На основании рекомендаций [1, с. 52], [2, с. 235], [7, с. 184], [9, с. 264], с помощью вспомогательной таблицы (в ней указаны условия первого опыта) составлен план отсеивающего эксперимента.

Последующие строки получают сдвигом элементов предыдущей строки на один знак вправо и перестановкой последнего знака предыдущей строки на первое место в данной строке.

Последняя строка плана должна состоять из элементов со знаками «-», а для оценки величины свободного члена в план вводят столбец со всеми положительными элементами «+» (табл. 1).

На основании рекомендаций [7, с. 186] принято решение включить в план эксперимента 4 дополнительных столбца для фиктивных факторов, перейдя, таким образом, к другому насыщенному плану. Это позволит не дублировать опыты, что важно для минимизации их количества и вполне оправдано при отсеивающем эксперименте.

Расчет коэффициентов регрессии:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} \cdot y_U}{N}, \quad (1)$$

где x – фактор; y – отклик или критерий оптимизации; i – номер фактора ($i = 0, 1, 2, \dots, k$); U – номер строки или опыта; N – количество строк или опытов [7, с. 70].

В соответствии со знаками, указанными в плане эксперимента (табл. 1), определяем коэффициенты.

Оценка дисперсии опыта:

$$S_y^2 = \frac{N \cdot \sum_{j=1}^{N-k-1} b_j^2}{N-k-1}, \quad (2)$$

где k – количество факторов; j – номер фиктивного фактора [7, с. 186].

Таким образом, получаем $S_y^2 = 96,4$

Определение дисперсии оценок коэффициентов регрессии:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (3)$$

$$S_{b_i}^2 = 8,03 [7, с. 76].$$

Определение величины доверительного интервала:

$$\Delta_{b_i} = t_{a-f1} \cdot S_{b_i}, \quad (4)$$

где t – критерий Стьюдента, зависящий от уровня значимости a (берем 0,05) и от числа степеней свободы f_1 ($f_1 = N - k - 1 = 12 - 7 - 1 = 4$) [7, с. 125].

При $a = 0,05$ и $f_1 = 4$, $t = 2,78$ [7, с. 281]

Таким образом, получается $\Delta_{b_i} = 7,9$.

Статистически значимые коэффициенты, т. е. те, для которых выполняется условие $|b_i| \geq \Delta b_i$, выделены в табл. 1 жирным курсивом.

Дальнейшим этапом будет проведение эксперимента для оставшихся 3 факторов: А – толщина наносимого слоя хрома (мкм); Б – плотность тока на электродах (А/дм²); В – температура электролита в ванне, (°С).

К примеру, если составить матрицу полного факторного эксперимента для оставшихся 3 факторов, то потребуются провести 8

опытов ($n^k = 2^3 = 8$). Если же не проводить отсеивание мало влияющих на отклик факторов, а сразу составить матрицу полного факторного эксперимента для 7 факторов, потребуется провести 128 опытов ($n^k = 2^7 = 128$).

Таким образом, цель данной работы достигнута. Очевидно, что проведение 12 опытов отсеивающего эксперимента методом Плакетта–Бермана и 8 опытов полного факторного эксперимента (итого 20) для 3 факторов предпочтительнее (с точки зрения экономии средств и времени), чем проведение 128 опытов для 7 факторов без их отсеивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. Издательство «Металлургия». Москва 1968. 155 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издание второе переработанное и дополненное. Издательство «Наука». Москва 1976. 279 с.
3. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи). Издательское объединение «Вища школа». 1976. 184 с.
4. Бородюк В. П., Вошинин А. П., Иванов А. З. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум): Учеб. пособие. Под ред. Г. К. Круга. М.: Высша. Школа. 1983. 216 с.
5. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Под ред. С. В. Мельникова 2-е изд. перераб. и доп. Л.: Колос. 1980. 168 с.
6. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / Издательство «Наука», Москва. 1965. 340 с.
7. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника. 1980. 304 с.
8. Труды ГОСНИТИ. Том № 113. Техническое обслуживание. Ремонт. Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Россельхозакадемии. 2014. С. 202–205.

9. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Издательство «Мир» Москва. 1977. 552 с.

BOLTING FACTORS IN DESIGN OF EXPERIMENT

Keywords: *knife, working body, wear resistant, experiment, factor, level of variation.*

Annotation. *The article describes the basic methods of choice of factors that have the most significant effect on the response. Listed the advantages and disadvantages of the existing methods of bolting factors and provided basis for the most suitable choosing for the specific experimental conditions as well as an algorithm of planning and conducting screening experiments and its results.*

КРУПИН АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ – ст. преподаватель кафедры «Технический сервис», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино, (krupin-ngiei@mail.ru).

KRUPIN ALEKSANDR EVGENYEVICH – senior lecturer of the chair «Technical service», Nizhny Novgorod state engineering and economic Institute, Russia, Knyaginino, (krupin-ngiei@mail.ru).

ЗУЙКОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВАИЧ – магистрант, Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино, (d1alap@bk.ru).

ZUYKOV DMITRIY VLADIMIROVICH – master degree student, Nizhny Novgorod state engineering and economic Institute, Russia, Knyaginino, (d1alap@bk.ru).
