

де  $t_{фр}$  – тривалість фронту трапецеїдального струму.

Враховуючи (6), запишемо

$$\frac{P_{ex}}{P_{осн}} = \frac{fdB_{cp-кв}}{2t_{фр}\rho^2 j^2}. \quad (7)$$

Число витків у обмотці вибирається з урахуванням перерахованих факторів, а діаметр проводу – із умов мінімальних сумарних втрат у обмотці.

Коефіцієнт трансформації визначається з умов глибини секціонування, приведеної ємності вторинної обмотки, яку вимагає навантажувальна характеристика.

Оптимальний варіант ВПП визначається шляхом порівняння можливих рішень для різних типорозмірів осердь, розташування та параметрів обмоток, типу та розміщення інших елементів, матеріалу ізоляції.

*Рассмотрены электромагнитные режимы работы высоковольтных преобразовательных устройств бортовых технологических установок.*

*It is investigated electromagnetic regimes of high-voltage converters for on-board technological set-ups.*

1. *Лейтес Л.В.* Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М. Энергия, 1981. – С. 392.
2. *Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н., Гуцалюк В.Я., Пазеев Г.Ф.* Высокочастотные трансформаторно-выпрямительные преобразователи высоковольтных систем электропитания для бортовых технологических установок // Техн. электродинамика. Тем. вып. "Проблемы сучасної електротехніки". – 2000. – Ч.2. – С. 64-67.

Надійшла 6.02.2008

УДК 621.311:664.72

**В.А. Дидур, Е.П. Масюткин,  
М.В. Постникова, В.А. Масловский**

## **НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПОДРАБОТКЕ ЗЕРНА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

*Для оптимізації технологічних процесів очистки зерна на потокових лініях агрегатів ЗАВ-20, ЗАВ-25, ЗАВ-40 зернопунктів сільськогосподарських підприємств запропоновано застосувати метод математичного планування експерименту. В результаті статистичної обробки даних отримані рівняння регресії, що адекватно описують процес очистки зерна на потокових лініях. Визначено технологічні режими, що забезпечують мінімум питомої витрати електроенергії, максимум якості зерна і продуктивності зерноочисних агрегатів.*

Современная ситуация на рынке энергоресурсов обуславливает необходимость анализа эффективности использования энергии параллельно с учётом количественных показателей. В связи с дефицитом энергоресурсов возникает необходимость экономии электроэнергии. Конечной мерой эффективности работы поточных линий зернопунктов сельскохозяйственных предприятий является удельный расход электроэнергии. Поэтому вопросы оптимизации технологических процессов очистки зерна на поточных линиях зернопунктов являются актуальными.

Целью статьи является обоснование минимальных удельных расходов электроэнергии при оптимизации процесса очистки зерна на поточных линиях зерноочистительных агрегатов ЗАВ-20, ЗАВ-25, ЗАВ-40 зернопунктов методом математического планирования эксперимента.

На рабочие органы и процессы рабочих машин поточных линий зернопунктов одно-

временно влияют разные факторы. Изменения одного фактора являются непосредственной причиной изменения влияния других факторов на параметры, которые исследуются. Поэтому, для исследования взаимодействия разных факторов, которые влияют на процесс очистки зерна, использованы математические методы планирования эксперимента [3, 4].

Так как зависимость удельного расхода электроэнергии от производительности нелинейная [1, 6], то для получения уравнения регрессии используются планы второго порядка (ОЦКП) Бокса и Уилсона. Этот метод имеет чёткую процедуру оптимизации [3].

Выбор факторов, интервалов варьирования, уровней сделан на основе анализа априорной информации. В качестве переменных факторов выбраны:  $x_1$  – производительность поточной линии зерноочистительного агрегата, т/ч;  $x_2$  – присоединённая мощность поточной линии, кВт;  $x_3$  – коэффициент загрузки поточной линии.

Интервалы варьирования факторов были согласованы с реальными возможностями настройки рабочих машин технологических линий подработки зерна.

В качестве отклика выбран удельный расход электроэнергии.

Матрицы планов, составленные для поточных линий зерноочистительных агрегатов, дали возможность получить уравнения регрессии, которые соединяют её функцию отклика с параметрами регрессии. Одновременно проверялись и анализировались статистические критерии: критерий Стьюдента (проверка коэффициентов на значимость), критерий Фишера (проверка модели на адекватность) [3].

Получены математические модели удельного расхода электроэнергии  $\tilde{y} = f(x_1, x_2, x_3)$  процесса очистки зерна на поточных линиях агрегатов ЗАВ-20, ЗАВ-25, ЗАВ-40 в виде уравнений регрессии второго порядка:

$$\begin{aligned} \text{ЗАВ-20} - \quad \tilde{y} = & 1,3403 - 0,876x_1 + 0,391x_2 + 0,379x_3 - 0,237x_1x_2 - 0,229x_1x_3 + 0,102x_2x_3 - \\ & - 0,055x_1x_2x_3 + 0,147x_1^2 + 0,197x_2^2 + 0,197x_3^2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ЗАВ-40} - \quad \tilde{y} = & 1,012 - 0,313x_1 + 0,283x_2 + 0,228x_3 - 0,102x_1x_2 - 0,082x_1x_3 + 0,07x_2x_3 - \\ & - 0,102x_1^2 + 0,084x_2^2 + 0,084x_3^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ЗАВ-25} - \quad \tilde{y} = & 1,4343 - 0,546x_1 + 0,489x_2 + 0,338x_3 - 0,207x_1x_2 - 0,143x_1x_3 + 0,123x_2x_3 - \\ & - 0,048x_1x_2x_3 - 0,089x_1^2 + 0,135x_2^2 + 0,135x_3^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Задача оптимизации процесса очистки зерна на поточных линиях зернопунктов – найти такие режимы работы поточной линии очистки зерна, которые бы в диапазоне изменения входных параметров представляли минимум удельного расхода электроэнергии, максимум производительности, максимум загрузки [5].

После получения адекватной математической модели второго порядка были определены координаты оптимума и изучены свойства поверхности отклика в окрестностях этого оптимума. Изучение поверхности отклика проведено с помощью двумерных сечений. При исследовании поочередно одни факторы фиксировались на верхнем (+1), а затем на нижнем (-1) уровнях варьирования, другие не фиксировались. При этом  $x_1 \rightarrow Q$ ,  $x_2 \rightarrow P$ ,  $x_3 \rightarrow K_3$ . По кривым сечений можно судить об изменении величины критерия оптимизации  $W_{y0}$  в зависимости от натуральных значений рассматриваемых факторов  $Q, P, K_3$ .

Например, для проведения анализа методом двумерных сечений уравнение регрессии (1) для ЗАВ-20 приводится к каноническому виду. Определяются частные производные для функции отклика и приравниваются к нулю [2]:

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_1} = -0,876 - 0,237x_2 - 0,229x_3 + 0,294x_1 - 0,055x_2x_3 = 0;$$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_2} = 0,391 - 0,237x_1 + 0,102x_3 + 0,394x_2 - 0,055x_1x_3 = 0;$$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_3} = 0,379 - 0,229x_1 + 0,102x_2 + 0,394x_3 - 0,055x_1x_2 = 0.$$

Решая систему уравнений, получим координаты центра:

$$x_{1S} = 1; \quad x_{2S} = -0,357; \quad x_{3S} = -0,333; \quad y_S = 0,559.$$

Раскодированный центр при оптимуме соответствует

$$Q = 20 \text{ т/ч}; P = 19,215 \text{ кВт}; K_3 = 0,6; W_{y\partial} = 0,568 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}.$$

Рассмотрение всех возможных двумерных сечений даёт наглядное представление о значениях критерия оптимизации  $W_{y\partial}$ , которое он будет принимать при варьировании уровней каждой пары факторов.

1) Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее показатель присоединенной мощности и коэффициента загрузки: при  $x_1 = 0$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_2} = 0,391 + 0,102x_3 + 0,394x_2 = 0;$$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_3} = 0,379 + 0,102x_2 + 0,394x_3 = 0;$$

$$x_{2S} = -0,793; x_{3S} = -0,752; y_S = 1,041.$$

Для канонического преобразования решается система

$$f(B) = \begin{vmatrix} 0,394 - B & 0,5 \cdot 0,102 \\ 0,5 \cdot 0,102 & 0,394 - B \end{vmatrix} = (0,394 - B)(0,394 - B) - 0,0026 = 0.$$

Собственными числами данного характеристического уравнения будут:

$$B_{22} = 0,343 \quad B_{33} = 0,445.$$

Каноническое уравнение будет иметь вид  $Y - 1,041 = 0,343X_2^2 + 0,445X_3^2$ .

Контурные кривые являются эллипсами. Центр эллипса будет минимумом. Поверхность отклика функции цели и её двумерные сечения для ЗАВ-20 при  $x_1 = 0$  приведены на рис. 1 а, б.

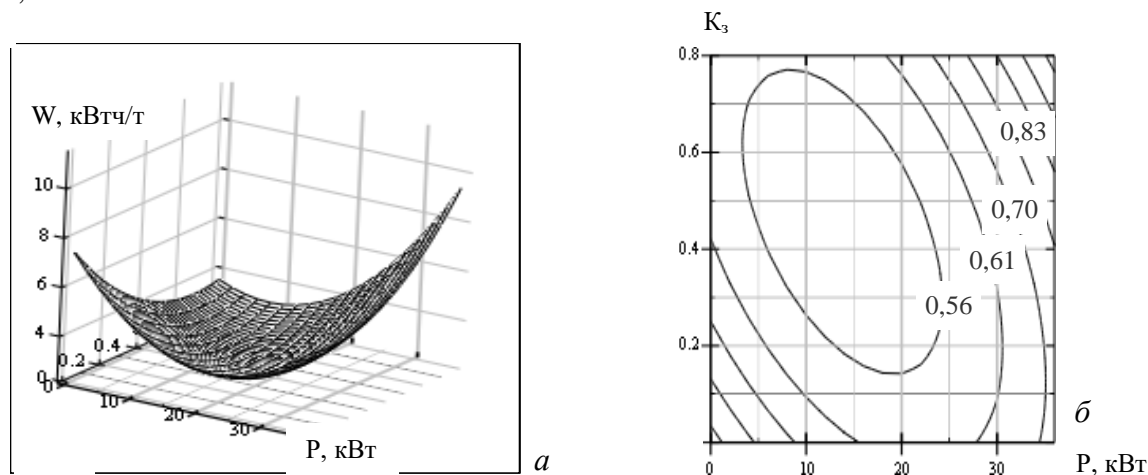


Рис. 1

2) Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее показатель производительности и коэффициента загрузки: при  $x_2 = 0$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_1} = -0,876 - 0,229x_3 + 0,294x_1 = 0;$$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_3} = 0,379 - 0,229x_1 + 0,394x_3 = 0;$$

$$x_{1S} = 4,016; x_{3S} = 1,406; y_S = -0,178.$$

Проводим каноническое преобразование уравнения, для чего решаем систему:

$$f(B) = \begin{vmatrix} -0,294 - B & -0,5 \cdot 0,229 \\ -0,5 \cdot 0,229 & 0,394 - B \end{vmatrix} = (0,394 - B)(0,294 - B) - 0,013 = 0.$$

Собственными числами данного характеристического уравнения будут:

$$B_{11} = 0,22 \quad B_{33} = 0,468.$$

Каноническое уравнение будет иметь вид  $Y + 0,178 = 0,22X_1^2 + 0,468X_3^2$ .

Контурные кривые являются окружностью, круглая впадина. Центр окружности будет минимумом. Поверхность отклика функции цели и её двумерные сечения для ЗАВ-20 при  $x_2 = 0$  приведены на рис. 2 а, б.

3) Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее показатель производительности и присоединенной мощности: при  $x_3 = 0$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_1} = -0,876 - 0,237x_2 + 0,294x_1 = 0;$$

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_2} = 0,391 - 0,237x_1 + 0,394x_2 = 0;$$

$$x_{1S} = 4,2; \quad x_{2S} = 1,55; \quad y_S = -0,209.$$

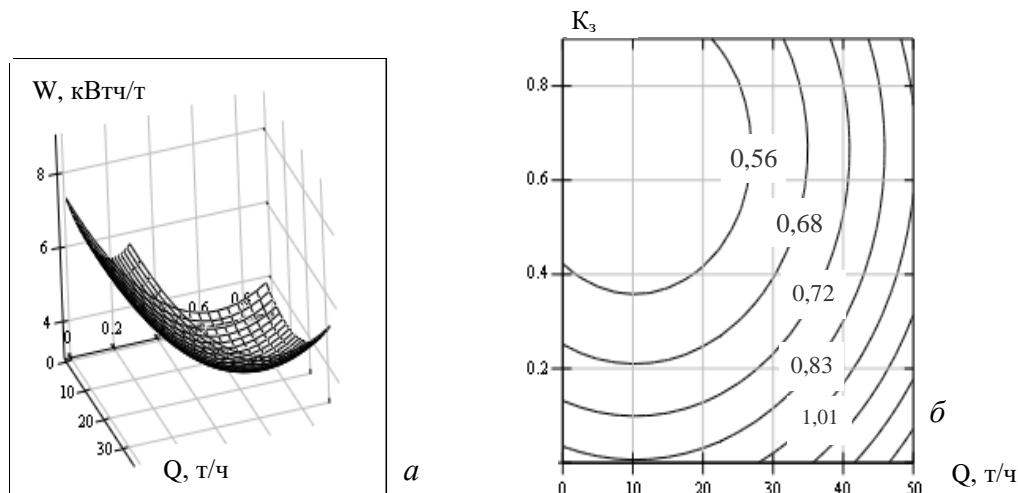


Рис. 2

Проводим каноническое преобразование уравнения, для чего решаем систему:

$$f(B) = \begin{vmatrix} 0,294 - B & -0,5 \cdot 0,237 \\ -0,5 \cdot 0,237 & 0,394 - B \end{vmatrix} = (0,294 - B)(0,394 - B) - 0,014 = 0.$$

Собственными числами данного характеристического уравнения будут:

$$B_{11} = 0,217 \quad B_{22} = 0,472.$$

Каноническое уравнение будет иметь вид:

$$Y + 0,209 = 0,217X_1^2 + 0,472X_2^2.$$

Контурные кривые являются окружностью. Центр окружности будет минимумом. Поверхность отклика функции цели и её двумерные сечения для ЗАВ-20 при  $x_3 = 0$  приведены на рис. 3 а, б.

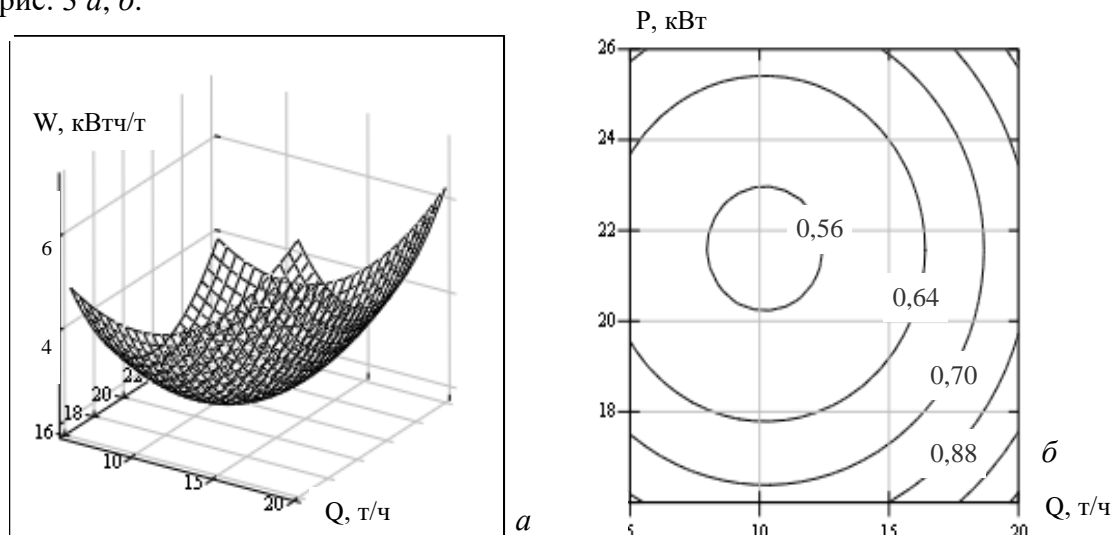


Рис. 3

Полученные в результате расчётов данные обрабатывались на ЭВМ с использованием прикладных программ Matchad-2000, Microsoft Excel 2000.

Аналогичные исследования проводились для агрегатов ЗАВ-40, ЗАВ-25 – уравнения (2), (3).

Раскодированный центр при оптимуме:

- для ЗАВ-40 соответствует  $Q = 40$  т/ч,  $P = 25$  кВт,  $K_3 = 0,583$ .

Оптимальное значение функции соответствует  $W_{y0} = 0,894$  кВт·ч/т;

- для ЗАВ-25 -  $Q = 20$  т/ч,  $P = 26$  кВт,  $K_3 = 0,526$ .

Оптимальное значение функции соответствует  $W_{y0} = 0,6$  кВт·ч/т.

Выводы.

1 Теоретическими исследованиями определён нелинейный экстремальный характер удельного расхода электроэнергии в зависимости от производительности, мощности и коэффициента загрузки. При этом установлено, что значения производительности, обеспечивающие минимальный удельный расход электроэнергии подвержены изменению в зависимости от мощности.

2 При помощи F-критерия Фишера доказано, что полученная математическая модель второго порядка достоверно описывает зависимость удельного расхода электроэнергии от производительности и коэффициента загрузки с вероятностью не менее 95 %.

3 Двумерные сечения поверхности отклика, полученные в результате обработки математической модели, позволили определить оптимальное сочетание и рациональные уровни варьирования выделенных факторов. Определено, что минимальный удельный расход электроэнергии будет, если значение факторов, наиболее влияющих на удельный расход электроэнергии будет следующий:

ЗАВ-20 –  $Q = 20$  т/ч,  $P = 19,215$  кВт,  $K_3 = 0,6$ ,  $W_{y0} = 0,568$  кВт·ч/т;

ЗАВ-40 –  $Q = 40$  т/ч,  $P = 25$  кВт,  $K_3 = 0,583$ ,  $W_{y0} = 0,894$  кВт·ч/т;

ЗАВ-25 –  $Q = 20$  т/ч,  $P = 26$  кВт,  $K_3 = 0,526$ ,  $W_{y0} = 0,6$  кВт·ч/т.

*Для оптимизации технологических процессов очистки зерна на поточных линиях агрегатов ЗАВ-20, ЗАВ-25, ЗАВ-40 зерноуниверсальных предприятий предложено применить метод планирования эксперимента. В результате статистической обработки данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс очистки зерна на поточных линиях зерноуниверсальных предприятий. Определены технологические режимы, обеспечивающие минимум удельного расхода электроэнергии, максимум качества зерна и производительности зерноочистительных агрегатов.*

*For optimization of technological processes of clearing of grain on production lines of units ZAV-20, ZAV-25, ZAV-40 grain-points of the agricultural enterprises to apply a method of planning the experiment. As a result of statistical data processing the equations of regress adequately describing process of clearing of grain on production lines are received. The technological modes providing a minimum of the specific charge of the electric power, maximum of quality of grain and productivity of grain stations are defined.*

1. Мартиненко І.І., Постнікова М.В. Обґрунтування норм витрати електроенергії на поточкових лініях зерноуниверсальних підприємств методом планування експерименту // Вісн. Харківського держ. техн. ун-ту сільськогосподарства “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Вип. 37. – Том 1. – Харків: ХДТУСГ, 2005. – С. 109-113.
2. Мельников С.В., Алёшкин В.Р., Роцин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
4. Новаковская З.Д., Кулевская Е.Ф. Методология перестройки модели проектирования электрической машины в модель, приспособленную к решению задач синтеза по стандартным программам на ЦВМ // Электромеханика: Изв. высш. учеб. завед. – 1976. - №12. – С. 1395-1399.
5. Остапчук Н.В. Оптимизация технологических процессов на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1974. – 270 с.
6. Постнікова М.В. Сучасний стан питання розробки нормативів електроспоживання на зерноуниверсальних підприємствах // Праці Таврійської держ. агротехн. акад. – Вип. 25. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – С. 102-107.