

## АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ҐРУНТООБРОБНОГО МОТОБЛОКУ

Ковальов О. В., Куценко Ю. М.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*В роботі на основі графоаналітичного аналізу поверхні відклику за допомогою двомірних перерізів визначені оптимальні значення експлуатаційних показників мотоблоку, що надають умовний екстремум параметру оптимізації.*

**Постановка проблеми.** Основними експлуатаційними показниками електромоблоку є сила тяги  $F$ , потужність тягового електродвигуна  $P$ , швидкість руху  $V$  та повна маса  $G$ . Зазвичай експлуатаційні показники визначаються на початковому етапі розробки мотоблоку за результатами аналізу заданих технологічних циклів роботи і умов експлуатації. Оскільки в наш час досвід проектування та експлуатації мотоблоків і культиваторів з електроприводом досить обмежений, тому достатньо актуальною проблемою є теоретичне обґрунтування оптимальних значень експлуатаційних показників електромоблоку різних класів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В книзі під редакцією А.П. Пролигіна [1] відмічено, що експлуатаційні показники мають істотний вплив на вибір параметрів тягових електричних машин електромобілів. Підкреслюється, що в процесі проектування тягових електродвигунів повинні враховуватися експлуатаційні показники електромобіля. Особливий інтерес містять запропоновані розрахункові формули для побудови граничної тягової характеристики  $F(V)$  електромобіля і визначення сумарної сили тяги  $F_{\Sigma}$  для встановленого значення швидкості руху

$$F_{\Sigma} = \psi \cdot G,$$

де  $G$  – експлуатаційна маса електромобіля;  
 $\psi$  – коефіцієнт опору руху.

В роботі [2] наведені результати системних експериментальних досліджень мотоблоків з ДВЗ, а також з тяговим електродвигуном. Приведені рекомендації по оптимальним значенням експлуатаційної маси мотоблоку з точки зору роботи без пробуксовування коліс при оранці важких, середніх та легких ґрунтів. Із останніх публікацій слід відмітити статтю [3], в якій методом планування експерименту отримана адекватна математична модель області оптимуму параметру оптимізації електромоблоку, в якості якого прийнята сила тяги.

**Мета статті.** Метою статті є проведення графоаналітичного дослідження області оптимуму і визначення значень експлуатаційних показників мотоблоку близьких до оптимальних на основі рівняння регресії, що адекватно описує область оптимуму параметра оптимізації мотоблоку, в якості якого приймається сила тяги  $F$ .

**Основні матеріали дослідження.** При рішенні задач оптимізації складних об'єктів для адекватного описання області оптимуму, як правило використовують поліном другого порядку.

Така математична модель може бути отримана для описання і дослідження області оптимуму параметру оптимізації електромоблоку на основі планів другого порядку, наприклад, ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП), методика проведення якого детально описана в літературі по плануванню експерименту [4,5]. При цьому в якості функції цілі або параметру оптимізації приймається сила тяги мотоблоку  $F$  і в якості незалежних змінних: корисна потужність приводного електродвигуна  $P$ , швидкість руху  $V$  і повна маса мотоблоку  $G$ . Позначення факторів та рівні їх варіювання приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фактори варіювання та їх рівні

Фактори	$P$	$V$	$G$
Одиниці вимірювання	$\kappa Bm$	$m/c$	$\kappa H$
Позначення факторів	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Рівні варіювання:			
верхній, $X_{i,B}$	3,0	1,2	2,7
нижній, $X_{i,H}$	0,6	0,4	0,9
нульовий, $X_{i,0}$	1,8	0,8	1,2
Інтервал варіювання, $\Delta X_i$	1,2	0,4	0,9

В роботі [3] методом ОЦКП було отримано математичну модель параметру оптимізації.

Рівняння параметру оптимізації має вигляд:

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 - 0,75x_1x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (1)$$

Рівняння (1) з урахуванням даних табл. 1 і співвідношень між факторами в фізичних та кодованих одиницях:

$$\begin{aligned} P &= x_1 \cdot 1,2 + 1,8 [\kappa Bm]; \\ V &= x_2 \cdot 0,4 + 0,8 [m/c]; \\ G &= x_3 \cdot 0,9 + 1,2 [\kappa H] \end{aligned} \quad (2)$$

може бути представлено через фактори  $P$ ,  $V$  та  $G$  в фізичних одиницях:

$$F = 1,31 + 1,77P - 0,97V - 0,15G + 1,56PV + 0,18P^2 + 0,75V^2 + 0,27G^2 \quad (3)$$

Отримане адекватне рівняння параметру оптимізації мотоблоку (1) в наведеному вигляді достатньо ускладнює дослідження області оптимуму, тому його необхідно представити в типовій канонічній формі. Перехід до канонічної форми виконується переносом початку координат факторного простору в точку центру поверхні відклику і поворотом осей на визначений кут в факторному просторі. При цьому паралельний перенос початку координат в центр усуває лінійні члени і змінює величину вільного члену в вихідному рівнянні, а поворот осей виключає взаємодію факторів.

В результаті канонічного перетворення, рівняння (1) прийме вигляд:

$$Y - Y_S = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2, \quad (4)$$

де  $Y$  – значення параметру оптимізації;

$Y_S$  – значення параметру оптимізації в центрі поверхні відклику, тобто в новому початку координат;

$X_1; X_2; X_3$  – канонічні змінні, які є лінійними функціями факторів;

$B_{11}; B_{22}; B_{33}$  – коефіцієнти канонічного рівняння.

Для визначення координат нового центру поверхні відклику  $S$  рівняння (1) необхідно виконати диференціювання по кожній змінній  $x_i$  і частинні похідні прирівняти нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 - 0,75x_2 + 0,52x_1 = 0, \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 - 0,75x_1 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Рішаючи систему рівнянь (5), отримаємо значення координат центру поверхні відклику  $S_Z$ :

$$x_{1S} = -0,997; \quad x_{2S} = 2,558; \quad x_{3S} = -1,636. \quad (6)$$

При підстановці значень координат в вихідне рівняння (1) визначаємо величину параметру оптимізації  $Y_S = 1,432$ .

Координатам  $x_{1S}; x_{2S}$  і  $x_{3S}$ , а також величині  $Y_S$  відповідають наступні значення факторів і функцій цілі в фізичних одиницях згідно (2):

$$\begin{aligned} P &= x_{1S} \cdot 1,2 + 1,8 = 0,60 \text{ кВт}; \\ V &= x_{2S} \cdot 0,4 + 0,8 = 1,82 \text{ м/с}; \\ G &= x_{3S} \cdot 0,9 + 1,2 = -0,27 \text{ кН}; \\ F &= 1,432 \text{ кН}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для отримання аналітичної і графічної інтерпретації області оптимуму використовуємо метод двомірних перерізів поверхонь відклику.

Розглянемо приклади побудови контурних кривих за отриманим рівнянням параметру оптимізації (1).

1. Приймаємо в (1)  $x_1 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $P = 1,8 \text{ кВт}$ . Двомірний переріз поверхні відклику в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від швидкості руху ( $x_2$ ) і маси ( $x_3$ ) мотоблоку. Рівняння (1) прийме вигляд:

$$\hat{y} = 3,1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (8)$$

Визначимо координати центру поверхні  $S_Z$  в результаті рішення системи рівнянь в частинних похідних:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0; \\ x_{2S} &= 4,292; \quad x_{3S} = -1,636. \end{aligned} \quad (9)$$

Після підстановки значень  $x_{2S}$  та  $x_{3S}$  в (8) визначиться величина параметру оптимізації  $Y_S = 0,301$ . Проводимо канонічне перетворення рівняння (18), характеристичний детермінант якого має вигляд:

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{11} - B \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

Рішення (10) запишемо в вигляді рівняння:

$$B^2 - a_1B + a_2 = 0,$$

де

$$a_1 = (b_{11} + b_{22}) = 0,12 + 0,22 = 0,34;$$

$$a_2 = (b_{11} \cdot b_{22} - 0,25b_{12}^2) = 0,0264,$$

і після підстановки отримаємо:

$$B^2 - 0,34B + 0,264 = 0.$$

Два корні цього рівняння  $B_{11} = 0,12$  та  $B_{22} = 0,22$  і визначають значення коефіцієнтів рівняння регресії в канонічній формі:

$$Y - 0,301 = 0,12X_1^2 + 0,22X_2^2. \quad (11)$$

Так як коефіцієнти  $B_{11}$  та  $B_{22}$  мають однакові знаки, то контурні криві будуть еліпсами. Контурні криві для значень  $Y_S = 0,301$  (центр); 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19 наведені на рис. 1.

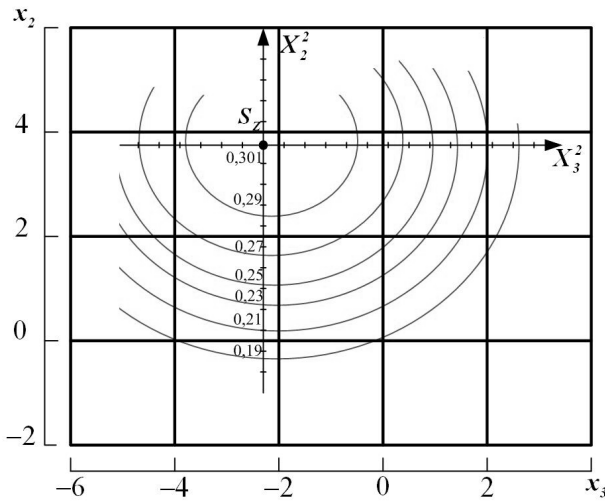


Рисунок 1 – Контурні криві перерізів поверхні відклику при  $x_1 = 0$  ( $P = 1,8 \text{ кВт}$ ) і значеннях  $Y_S = 0,301; 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19$

2. Приймаємо в (1)  $x_2 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $V = 0,8 \text{ м/с}$ . Двовірний переріз поверхні відклику в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від потужності ( $x_1$ ) і маси ( $x_3$ ) мотоблоку. Рівняння (1) прийме вигляд:

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 + 0,73x_3 + 0,26x_1^2 + 0,22x_3^2. \quad (12)$$

Визначимо координати центру поверхні і величину параметру оптимізації:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

В результаті рішення системи отримуємо  $x_{1S} = -2,692$ ;  $x_{3S} = -1,636$  та  $Y_S = 0,626$ . Рішення характеристичного детермінанта для цього випадку має вигляд квадратного рівняння:

$$B^2 - 0,48B + 0,0572 = 0, \quad (14)$$

корні якого дорівнюють  $B_{11} = 0,22$  і  $B_{22} = 0,28$  та рівняння в канонічній формі має вигляд:

$$Y - 0,626 = 0,22X_1^2 + 0,28X_3^2. \quad (15)$$

В цьому випадку контурні криві будуть також еліпсами (рис. 2).

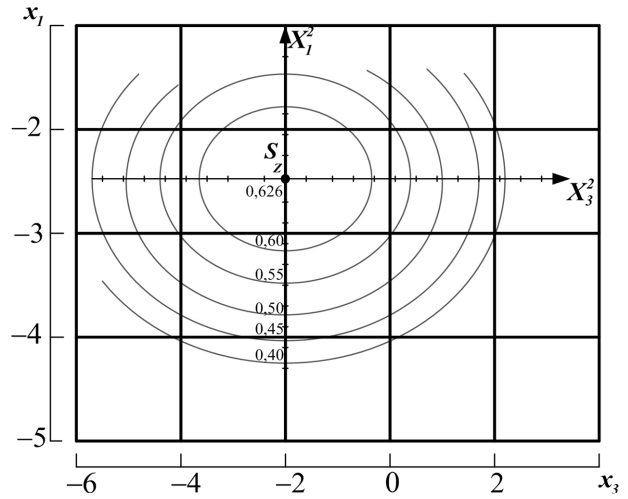


Рисунок 2 – Контурні криві перерізів поверхні відклику при  $x_2 = 0$  ( $V = 0,8 \text{ м/с}$ ) і значеннях  $Y_S = 0,626$  (центр);  $0,6; 0,55; 0,5; 0,45; 0,4$

3. Приймаємо в (1)  $x_3 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $G = 1,2 \text{ кН}$ . Двовірний переріз поверхні відклику в даному випадку буд характеризувати параметр оптимізації в залежності від потужності ( $x_1$ ) та швидкості ( $x_2$ ). При канонічному перетворенні (1) для даного випадку окрім переносу початку координат в нову точку  $S_2$ , відбувається також поворот осей на деякий кут  $\alpha$  в факторному просторі, в результаті чого в рівнянні (1) зникає парна взаємодія факторів ( $x_1 \cdot x_2$ ). Згідно [4] кут повороту осей визначається за формулою:

$$\text{ctg } 2\alpha = \frac{b_{ii} - b_{jj}}{b_{ij}}. \quad (16)$$

У нашому випадку:

$$\text{ctg } 2\alpha = \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{12}} = \frac{0,26 - 0,12}{-0,75} = -0,187,$$

що відповідає куту  $\alpha = -36^\circ 12'$ . Остаточне початкове рівняння (1) прийме вигляд:

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_3^2. \quad (17)$$

Визначимо координати центру поверхні відклику диференціюванням рівняння (15) і вирішенням системи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

звідки

$$x_{1S} = -\frac{1,4}{0,52} = -2,69; \quad x_{2S} = -\frac{1,03}{0,24} = 4,29.$$

Значення параметра оптимізації в центрі поверхні відклику визначиться в результаті підстановки в (15) координат  $x_{1S}$  і  $x_{2S}$ .

$$Y_S = 3,1 + 1,4(-2,69) - 1,03 \cdot 4,29 + 0,26(-2,69)^2 + 0,12 \cdot 4,29^2 = -1,0 \quad (19)$$

Рівняння регресії (17) в канонічній формі має вигляд:

$$Y + 1 = 0,26X_1^2 + 0,12X_2^2. \quad (20)$$

Оскільки коефіцієнти канонічного рівняння  $B_{11}$  і  $B_{22}$  мають однакові знаки, то контурними кривими двовимірних перерізів поверхні відклику є еліпси. Контурні криві перерізів поверхні відклику при  $x_3 = 0$  і значеннях параметра  $Y_S = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$  наведені на рис. 3.

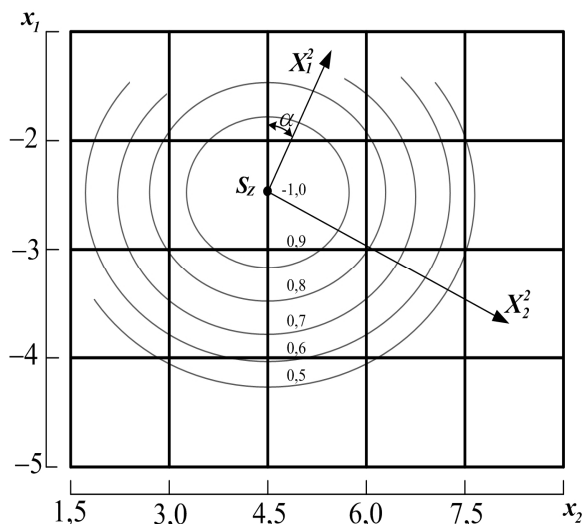


Рисунок 3 – Контурні криві двовимірних перерізів поверхні відклику при  $x_3 = 0$  ( $G = 1,2 \text{ кН}$ ) і значеннях  $Y_S = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$

З рис. 3 видно, що в даному перерізі поверхні відклику максимальне значення параметра оптимізації  $Y_S = -1,0 \text{ кН}$  має місце при значеннях  $x_{1S} = -2,69$  і  $x_{2S} = 4,29$  або у фізичних одиницях потужність  $P = -1,43 \text{ кВт}$  і швидкість  $V = 2,2...3,0 \text{ м/с}$  при  $G = 1,2 \text{ кН}$ .

#### Висновки.

1. Методом двовимірних перерізів поверхні відклику визначені координати центру поверхні  $S_z$  для кожної пари факторів і значення параметру оптимізації в центрі.

2. Розраховані і побудовані контурні криві та визначені раціональні границі зміни експлуатаційних

показників, що забезпечують величину параметру оптимізації близькою до оптимальної.

3. За результатами проведених досліджень рекомендуються наступні раціональні границі варіювання основних експлуатаційних показників, що слід врахувати на стадії проектування електрифікованих мотоблоків легкої та середньої серій:  $P = 1,5...3,0 \text{ кВт}$ ;  $V = 0,4...1,0 \text{ м/с}$ ;  $G = 0,8...1,6 \text{ кН}$ . Методика вибору та розрахунку експлуатаційних показників за даними технічного завдання детально розглядається в [3].

#### Список використаних джерел

1. Электрические машины в тяговом автономном электроприводе / [Ю. М. Андреев, К. Г. Исаакян, А. Д. Машихин и др.]: под ред. А. П. Пролыгина – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
2. Кусов Т. Т. Создание энергетических средств с электромеханическим приводом / Т. Т. Кусов // Тракторы и сельскохозяйственные машины – 1988. - №10. – С. 12-17.
3. Ковальов О. В. Оптимізація експлуатаційних показників електромоблоку методом планування експерименту / О. В. Ковальов, Ю. М. Куценко, М. О. Рубцов, Г. Н. Назар'ян // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11., Т.4. – С. 187-200.
4. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин – Л.: Колос, 1980. -168 с.
5. Назар'ян Г. Н. Практический курс планирования эксперимента / Г. Н. Назар'ян – Мелітополь, 1999. – 66 с.

#### Аннотация

#### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО МОТОБЛОКА

Ковалев А. В., Куценко Ю. Н.

*В работе на основе графоаналитического анализа поверхности отклика с помощью двумерных сечений определены оптимальные значения эксплуатационных показателей мотоблока, дающих условный экстремум параметра оптимизации.*

#### Abstract

#### THE BASIS ANALYSIS DETERMINATION BY SECTIONS THE OPTIMUM OPERATING INDEXES OF THE ELECTRIFIED MOTOBLOCK

A. Kovalyov, Y. Kutcenko

*In article on the basis analysis surface of response by sections the optimum values of operating indexes of mottoblock, giving's conditional parameter of optimization are certain.*