УДК 629.631.552

# ПОБУДОВА ЕКСПЕРТНОЇ МОДЕЛІ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЗБИРАЛЬНО-ТРАНСПОРТНИХ КОМПЛЕКСІВ

***С. І. Козупиця, кандидат технічних наук***

**Анотація.** *В статті запропонована методика, яка дозволить на практиці вирішувати задачу векторної оптимізації процесу роботи збирально-транспортного комплексу при обмеженій кількості статистичних даних, а також виявити основні взаємозв'язки та закономірності технологічного процесу на збиранні і транспортуванні врожаю.*

**Ключові слова:** ***експертне моделювання, багатокритеріальна оптимізація, поліноми апроксимації, самоорганізація***

**Постановка проблеми.** Агропромислове виробництво України характеризується значним потенціалом, який за оцінками експертів може суттєво підвищити її економіку. Використання цього потенціалу має бути ефективним, супроводжуватись сталим розвитком, бути екологічнобезпечним та ресурсовідновним.

**Аналіз останніх досліджень.** Збирання врожаю зернових культур належить до енерго- і трудомістких процесів, та на нього припадає понад половини експлуатаційних затрат коштів на виробництво зерна. Від раціональної та інженерно-наукової організації роботи збирало-транспортних комплексів суттєво залежить ефективність капіталовкладень в агропромисловий комплекс [4].

При оптимізації складних техніко-економічних систем, яким є збирально-транспортні комплекси, є необхідність побудови математичних моделей, для яких не завжди є достатня кількість експериментально-статичних даних. Це відчутно, коли оптимізацію слід провести по декільком критеріям якості і при цьому вони є протирічні.

Для умови недостатності експериментальних даних пропонуємо скористатись застосування залучення думки експертів, які мають достатній досвід в побудові та експлуатації складних технічних систем досліджувального класу, що дозволить провести моделювання складного збирально-транспортного процесу врожаю.

Дослідження проводимо із застосуванням векторної оптимізації за узагальненими критеріями надійність-вартість. Під надійністю слід розуміти ймовірність знаходження визначених параметрів всіх

*© С. І. Козупиця, 2016*

елементів збирально-транспортного комплексу в допустимих за умовами ефективності роботи межах.

Застосування експертного моделювання складних в рільничих технологічних системах дасть змогу дослідити закономірності зміни основних функціональних показників при роботі збирально-транспортних комплексів, здійснити їх інженерно-вартісне оцінювання і на цій основі обґрунтувати їх раціональний склад, узгодити сумісні режими роботи окремих агрегатів.

Природно, що на цьому етапі моделювання мова може йти про попередні розрахунки, які орієнтовані на визначення основних факторів, що впливають на надійність та вартість роботи збирально-транспортного комплексу.

**Результати досліджень.** Для вирішення задачі оптимізації необхідно мати такі відправні дані математичної моделі.

1. Критерії:

$$y_1' = f_1(x); \; y_2 = f_2(x),$$

де: $y_1'$ – надійність об'єкта космічної діяльності (критерій, який підлягає максимізації); $y_2$ – вартість заходів, від яких залежить надійність (критерій, який підлягає мінімізації); $f_1$ та $f_2$ – деякі критеріальні функції; $x = \{x_i\}_{i=1}^{n}$ – n -мірний вектор незалежних змінних (аргументи оптимізації).

2. Обмеження по незалежних змінних $x \in X$, де:

$$X = \{x \,|\, x_{i\min} \le x_i \le x_{i\max}, \; i \in [1, n]\}.$$

3. Обмеження за критеріями $y \in M$, де M – область визначення вектора критеріїв, $y = \{y_k\}_{k=1}^{S}$ – s-мірний вектор мінімізуючих невід'ємних критеріїв (s = 2). Відзначимо, що в якості єдиного способу екстремізації критеріїв в даній задачі обрана мінімізація. Щоб критерій за характеристикою надійності зробити також мінімізуючим, визначимо $y_1 = 1 - y_1'$ (якщо 100% надійність виражається одиницею). Тоді:

$$M = \{y \,|\, 0 \le y_k \le A_k, \; k \in [1;2]\}.$$

Обмеження $x_{i\min}$ та $x_{i\max}$ по аргументам $x \in X$ і $A_к$ за критеріями $y \in M$ задаються, виходячи з фізичних міркувань. Якщо перераховані відправні дані є, то існують всі передумови для оптимізації космічних об'єктів за критеріями надійності та вартості, тобто для визначення компромісно-оптимальних значень параметрів $x^* = \{x^*_i\}_{i=1}^{n}$.

Зважаючи на очевидну суперечливість критеріїв необхідно вдатися до специфічних методів теорії багатокритеріальної (векторної) оптимізації. Якщо використовується спосіб скалярної згортки, то математично модель вирішення завдання векторної оптимізації представляється у вигляді [2]:

$$x^* = \arg\min_{x \in X} Y[y(x)], \tag{1}$$

де: *Y(y)* – скалярна функція в розумінні скалярної згортки вектора часткових критеріїв, вид якої залежить від обраної схеми компромісів. При цьому потрібно переконатися, що її мінімізація призводить до парето-оптимального рішення: $x^* \in X^K$. У роботах [1, 2] запропонована скалярна згортка з нелінійної схемою компромісів

$$Y[y(x)] = \sum_{k=1}^{S} A_k [A_k - y_k(x)]^{-1}, \tag{2}$$

де: S – розмірність вектора критеріїв. Згортка (2) дає можливість формалізовано отримувати парето-оптимальні рішення, адекватні заданим ситуаціям. При s = 2 модель (1) набуде вигляду:

$$x^* = \arg\min_{x \in X} \left[ \frac{A_1}{A_1 - y_1(x)} + \frac{A_2}{A_2 - y_2(x)} \right]. \tag{3}$$

Якісний склад вектора *x* досить різноманітний, і відповідно розмірність *n* цього вектора в загальному випадку велика. Повний облік параметрів *x* привів би до невиправданого ускладнення критеріальних функцій $f_1$ та $f_2$ і до надмірних труднощів рішення оптимізаційної задачі. Тому природним є вибір тільки найбільш інформативних параметрів *x* – координат простору, в якому буде здійснюватися оптимізація критеріїв $y_1$ і $y_2$, в той час як інші параметри вважаються фіксованими і заданими.

Вибір будемо виконувати за участю експертів. Їх знайомлять з умовами завдання, тобто називають конкретний тип розроблюваного космічного об'єкта (ракета-носій або космічний апарат), описують умови його проектування, виробництва, випробувань та експлуатації. Експерти повинні виявити ті заходи, які, на їхню думку, можуть впливати на надійність і вартість даного космічного об'єкта на різних стадіях життєвого циклу виробу. До них відносяться кратність резервування систем управління ($x_1$), значення коефіцієнтів запасу по міцності конструкції ($x_2$) і по потужності енергоджерел ($x_3$); відносний обсяг вхідного контролю матеріалів і комплектуючих ($x_4$); підбір технологій виробництва та відносний обсяг контролю їх стабільності ($X_5$); обсяг проведення контрольно-вибіркових випробувань ($x_6$); обсяг експериментальної відпрацювання елементів і систем у всіх режимах ($x_7$); величина матеріального стимулювання персоналу ($x_8$) і т.д. У результаті спеціальної процедури [1] визначаються адекватний якісний склад і розмірність п вектора незалежних змінних $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$ критеріальних функцій $f_1$ (x) та $f_2$ (x).

Вид критеріальних функцій залежить від відомостей, якими володіє дослідник для побудови моделі. Спектр широкий - від повного знання механізмів явищ (детермінована модель) до повної невизначеності («чорний ящик»). Між цими інформаційними полюсами знаходиться імовірнісний рівень невизначеності. Детерміновану математичну модель *f* (x) будь-якої характеристики об'єкта космічної діяльності розробити важко через складності відбуваються фізичних процесів і реакцій об'єкта на комплекс внутрішніх і зовнішніх факторів.

Розглянемо, наприклад, критеріальну функцію надійності $f_1$ (x) і апроксимуємо її на безлічі аргументів $x \in X$ деякої наближеної функції $F_1$ (x, a), відомої з точністю до вектора констант (коефіцієнтів) $a = \{a_j\}^m_{j=1}$.

При виборі виду функції $F_1$ (x, a) слід мати на увазі [2], що найкращими будуть результати, якщо регресійна модель будується на основі деякої відомої інформації про механізми досліджуваних явищ. Тоді модель є змістовною. При відсутності такої інформації доводиться працювати в класі формальних регресійних моделей і вдаватися до великих обсягів обчислень.

До формальної моделі пред'являються дві суперечливих вимоги. З одного боку, наближає функція повинна бути досить простою, щоб процеси обчислень не опинилися надмірно громіздкими. З іншого боку, апроксимуюча залежність повинна мати достатні прогностичні і точні властивості. У більшості практичних випадків обидва ці вимоги виконуються в класі регресійних поліномів другого порядку [2, 3]:

$$F_1(x, a) = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{i,\, j=1,\, i<j}^{n} a_{ij} x_i x_j \,, \qquad (4)$$

де: $a_0$, $a_1$, $a_{ij}$ – коефіцієнти. Функція (4) досить добре адаптується до топографії цільової функції $f_1$ (x), вона здатна виражати такі особливості, як, наприклад, овражність. На практиці використовуються різні усічення регресійного полінома (4), в основному лінійні наближення.

Визначення коефіцієнтів a може бути виконане як методами інтерполяції, так і методом найменших квадратів (МНК). Інтерполяційні формули передбачають точний збіг наближає і цільової функцій в опорних точках (вузлах інтерполяції), кількість яких N визначається числом невідомих констант a, рівним m. Коефіцієнти a знаходяться рішенням певної системи рівнянь для критерію надійності:

$$F_1(x^{(u)}, a) = f_1(x^{(u)}), \; u \in [1, N = m], \qquad (5)$$

де: $x^{(u)}$ – вузли інтерполяції. Передбачається, що значення цільової функції у вузлах апроксимації $f_1(x^{(u)}), u \in [1, N]$ відомі. Але для їх отримання слід звернутися до експертів. Це - ключовий момент у цій роботі, що розглядається нижче. МНК передбачає N опорних точок (вузлів апроксимації), причому число N може бути більше, менше або дорівнює (як окремий випадок) кількістю констант m. Невідомі коефіцієнти наближає функції визначаються з умови.

$$E(a) = \sum_{u=1}^{N} [F_1(x^{(u)}, a) - f_1(x^{(u)})]^2 = \min_a . \tag{6}$$

Використовуючи необхідна умова мінімуму функції, одержуємо звану в теорії МНК систему нормальних рівнянь для критерію надійності [2]:

$$\frac{\partial E(a)}{\partial a_j} = 0, \; j \in [1, m], \tag{7}$$

рішення якої визначає коефіцієнти апроксимуючої функції. Відзначимо, що незалежно від числа обираних опорних точок N система нормальних рівнянь (7) завжди є певною.

Для критерію вартості $f_2$ (x) справедливі всі вищевикладені міркування, але замість $a = \{a_j\}^m{}_{j=1}$ у виразенні апроксимуючої функції $F_2$ (x, a) в загальному випадку фігурує інший вектор невідомих констант – $b = \{b_h\}^p{}_{h=1}$.

Специфіка розглянутої задачі полягає в складності отримання значень цільових функцій в опорних точках. Дійсно, навіть для однієї опорної точки, яка відповідає сформованому до теперішнього часу комплексу заходів щодо забезпечення надійності космічного об'єкта даного класу, немає достатньої статистики для впевненої оцінки рівня надійності. Це особливо відноситься до знову розробленим об'єктам, які не мають тривалого періоду експлуатації. І зовсім ілюзорні можливості об'єктивної оцінки надійності для інших точок області існування аргументів оптимізації $x \in X$ .

У тих випадках, коли завдання важкоформалізуюче, доводиться вдаватися до методів експертних оцінок. Кваліфікований фахівець (експерт), що має достатній досвід у проектуванні, виробництві та експлуатації об'єктів даного класу, може провести уявний експеримент і представити рівні надійності об'єкта при різних поєднаннях факторів $x \in X$ . Таким чином, в основі методу лежить індивідуальна думка (постулат), висловлюване фахівцем-експертом про об'єкт оцінки, виходячи зі свого професійного досвіду. Основним недоліком постулювання є можливість суб'єктивного довільного вибору. Метод обробки експертних оцінок дозволяє зменшити цей недолік. Згідно методу для оцінки деякої кількісної характеристики використовуються постулати не одного, а кількох осіб, компетентних у даному питанні. Передбачається, що "справжнє" значення невідомої кількісної характеристики знаходиться всередині діапазону оцінок експертів і колективна думка є більш достовірним. В роботі [2] запропонована процедура обробки даних експертних оцінок, в ході якої отримані уточнені агреговані оцінки, а також (як супутній продукт) визначаються коефіцієнти довіри до думку окремих експертів. Застосувавши цей метод до обробки експертних оцінок надійності і вартості в кожній з N вузлових точок області визначення $x \in X$, отримаємо два вектори оцінок (квазіекспериментального дані):

$$\{f_1(x^{(u)})\}_{u=1}^{N}, \ \{f_2(x^{(u)})\}_{u=1}^{N},$$

які служать підставою для визначення векторів констант *a і b* у разі застосування способу інтерполяції або за умовами (6), (7), якщо застосовується МНК. Так визначаються математичні регресійні моделі:

$$y_1' = f_1(x) \approx F_1(x); \ y_2 = f_2(x) \approx F_2(x),$$

які задіяні в оптимізаційній процедурі (3). Оскільки інформація про цільові функціях у вузлових точках області апроксимації отримана не експериментально, а шляхом експертного оцінювання, то і моделі $F_1$ (x) $F_2$ (x)називаються експертними регресійній моделі.

Розглянемо проблему вибору способу апроксимації критеріальних функцій в заданих обставинах. При різних усічених регресійного полінома (4) кількість невідомих констант, як правило, перевищує ту кількість N вузлів апроксимації, в яких експерт може досить впевнено дати свою оцінку величини критеріальною функції. Тому, використовуючи спосіб інтерполяції, отримаємо недовизначена систему рівнянь, в якій число рівнянь менше числа невідомих констант. Щоб не допустити цього, слід застосувати метод найменших квадратів, що в математиці розглядається як спосіб вирішення недовизначених, перевизначених і певних (як окремий випадок) систем рівнянь.

**Висновок.** Запропонована методика дозволить на практиці вирішувати задачу векторної оптимізації процесу роботи збирально-транспортного комплексу при обмеженій кількості статистичних даних, а також виявити основні взаємозв’язки та закономірності технологічного процесу на збиранні і транспортуванні врожаю.

## Список літератури

1. *Советов Б. Я.* Моделирование систем: ученик для бакалавров / *Б. Я. Советов, С. А. Яковлев*. – 7-е узд. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 343 с. – Серия: Бакалавр.

2. *Воронин А. Н.* Векторная оптимизация динамических систем / *А. Н. Воронин, Ю. К. Заитдинов, А. И. Козлов*. – К.: Техника, 1999. – 248 с.
3. *Воронин А. Н.* Нелинейная схема компромиссов в многокритериальных задачах оценивания и оптимизации / *А. Н. Воронин* // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №4. – С. 106–114.
4. *Адамчук В. В.* Планування проектів вирощування культур на основі статистичного імітаційного моделювання: монографія / *В. В. Адамчук, О. В. Сидорчук, П. М. Луб, А. М. Тригуба, Л. Л. Сидорчук, П. В. Шолудько, І. П. Івасюк*. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2014. – 224 с.

**Аннотация.** *В статье предложена методика, которая позволит на практике решать задачу векторной оптимизации процесса работы уборочно-транспортного комплекса при ограниченном количестве статистических данных, а также выявить основные взаимосвязи и закономерности технологического процесса на уборке и транспортировке урожая.*
**Ключевые слова: *экспертное моделирование, многокритериальная оптимизация, полиномы аппроксимации, самоорганизация***

**Annotation.** *The paper proposes a method that allows in practice to solve the problem of vector optimization process work harvesting and transport complex with a limited amount of statistical data and to identify the basic relationships and patterns of the process for harvesting and transporting crops.*
**Key words: *expert modeling, multi-criteria optimization, polynomial approximation, self-organization***

УДК: 631.354.2

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБИРАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

***С. В. Смолінський, кандидат технічних наук, доцент***
***Національний університет біоресурсів і природокористування України***
***С. С. Левчук, інженер***
***Міністерство аграрної політики та продовольства України***
***С. О. Маранда, інженер***
***Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»***

**Анотація.** *В статті наведено результати енергетичної оцінки застосування сучасних зернозбиральних комбайнів в залежності*

*© С. В. Смолінський, С. С. Левчук, С. О. Маранда, 2016*