

УДК 621.436: 534.833.004

СПОСОБИ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ЗІ ЗМІННИМ СКЛАДОМ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ

Л. Л. Тітова

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття зі спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція автора: l_titova@nubip.edu.ua.

Історія статті: отримано – січень 2021, акцептовано – червень 2021, опубліковано – 30 липня 2021 року.

Бібл. 26, рис. 2, табл. 3.

Анотація. В статті проведено дослідження та узагальнення способів організації виробничих процесів зі змінним складом устаткування машин для лісотехнічних робіт. Планування обчислювального експерименту для оптимальної організації виробничих процесів зі змінним складом устаткування. Для виробничих процесів зі змінним складом устаткування машин для лісотехнічних робіт проведення натурних експериментів часто стає нераціональним або неможливим через складність організації, великих витрат, обмеженості ресурсів, тому відбувається заміна обчислювальними методами, в яких дослідженню підлягають математичні моделі процесів. До теперішнього часу розроблено велику кількість методів математичного моделювання, планування експерименту, обробки результатів, оптимізації. Їх різноманітність пов'язано з тим, що для вирішення, виробничих завдань різних класів потрібно облік різних нюансів, і тому необхідно виробити, методи, які володіли б достатньою універсальністю. Рішення практичних завдань за допомогою апарату моделювання, планування експерименту може бути ускладнене порушенням умов застосовності методів, складністю їх реалізації.

Таким чином, актуальність приведеного дослідження в статті обумовлена необхідністю вдосконалення методів планування і обробки результатів комп'ютерних експериментів, їх адаптації до специфіки виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. Ефективність виробничих процесів може бути досягнута при правильному складанні комплектів машин за типами, чисельності та відповідної організації роботи.

Ключові слова: методика, машини для лісотехнічних робіт, виробничий процес, продуктивність.

Постановка проблеми

Одним з видів виробничих процесів зі змінним складом устаткування є лісозаготівлі, що займають в економіці України значне місце [1]. Виходячи з результатів досліджень виробничих процесів зі

змінним складом устаткування машин для лісотехнічних робіт виявлено, що їх дослідження за допомогою натурних експериментів важко [2]. Виконаний огляд досліджень в області математичного моделювання, оптимізації комплектів машин і організації лісозаготівельних процесів [3].

Змінна продуктивність комплекту ($P_{зм}$) визначається кількістю сировини, переробленої ними протягом зміни [4]. Продуктивність всього комплекту може бути рівною продуктивності машин для лісотехнічних робіт на кожну операцію [5]. Він відповідає вимогам послідовної організації виробництва:

$$P_{зм_c} = P_{зм_1} = P_{зм_2} = P_{зм_3} = \dots = P_{зм_n} \quad (1)$$

Однак, як показує існуюча практика [6], не вдається підібрати комплект машин і устаткування з однаковою [7] або незначно відрізняючою продуктивністю [8].

Аналіз останніх досліджень

Схема паралельно-послідовного виконання виробничого процесу включає ряд машин, що працюють паралельно один одному і передавальних об'єкти праці машин [9], що працюють послідовно; можливі і зворотні випадки [10] – передача об'єктів праці від машин, що працюють послідовно до машин, що працюють паралельно [11].

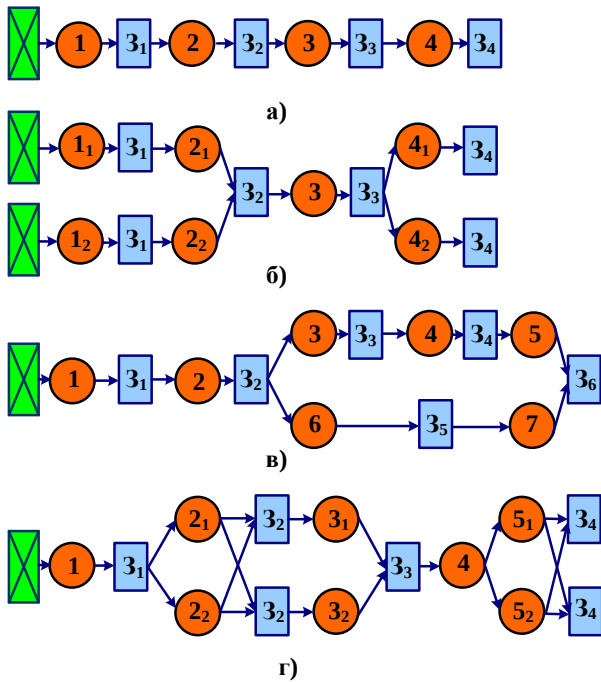
Змінна продуктивність послідовно з'єднаних машин і механізмів повинна бути рівною продуктивності машин, що працюють паралельно:

$$[(P_{зм_{1a}} \approx P_{зм_{2a}}) + (P_{зм_{1b}} \approx P_{зм_{2b}})] \approx P_{зм} \approx (P_{зм_{4a}} \approx P_{зм_{4b}}) \quad (2)$$

В цих же схемах можливі варіанти [12], коли паралельно може працювати різну кількість машин [13]. При цьому бажано наступне дотримання відношення продуктивності:

$$P_{зм_1} \approx P_{зм_2} \approx [(P_{зм_3} \approx P_{зм_4} \approx P_{зм_5}) + (P_{зм_6} \approx P_{зм_7})] \quad (3)$$

Схеми виконання виробничого процесу представлені на рис. 1.



ТЗ – технічні засоби для виконання операцій;
О – оперативний запас об'єктів праці;
З – запас сировини.

Рис. 1. Схеми можливих варіантів технологічних систем: а) схема послідовного агрегування з гнучкими зв'язками; б, в) ті же розгалужені і сходяться; г) те ж змішаного типу з гнучкими зв'язками.

Fig. 1. Schemes of possible variants of technological systems: а) the scheme of consecutive aggregation with flexible connections; б, в) the same branched and converging; г) the same mixed type with flexible connections.

Характер схем комплектів машин для лісотехнічних робіт [14] і вид їх зв'язку обумовлює наявність запасів ресурсів між операціями потоку [15], їх призначення і розміщення [16]. Особливістю протікання виробничих процесів є те, що між суміжними операціями створюються запаси об'єктів праці [17], ресурсів [18]. Міжопераційні запаси – багаторівневі. Будь-які технічні засоби (ТЗ) ненадійні в роботі, кожен має свій коефіцієнт технічного використання [19]. Найбільш невідгідна ситуація для пари операцій, коли виходить з ладу попередній ТЗ, а об'єм запасів на мінімальному рівні або відсутній [20]. Технічна причина, що викликає потребу створення запасів даного типу, визначила їх назва – технічні [21]. У той же час, цей об'єм запасів ресурсів попереджає простої подальшого ТЗ, коли попереднє простоє [22]. Ці запаси страхують безперебійну роботу ТЗ, тому, правомірно їх називати страховими (Z_C, m^3).

Запаси, що забезпечують компенсацію нерівномірності їх поповнення споживання, зростання яких потрібно обмежувати [23], коли норма вироблення технічних засобів на попередній операції вище, ніж на наступній; або збільшувати до певного рівня, коли норма вироблення технічних коштів на попередній операції менше, ніж на наступній отримали назву організаційні (Z_0, m^3). Гарантійний запас (Z_G, m^3) це запас, що складається з суми страхового та організаційного запасів [24]. Організаційний об'єм

запасів доповнює страховий до об'єму, який гарантує безперебійну роботу технічного засобу, тому правомірно називати його гарантійним [25]. Таким чином, міжопераційні запаси ресурсів мають граничну для конкретних умов величину, яка гарантує безперебійну роботу ТЗ, в загальному вигляді можуть бути розраховані за формулою:

$$Z_G = Z_0 + Z_C \quad (4)$$

Можливі два варіанти роботи комплексу машин у виробничому процесі зі змінним складом устаткування (рис. 2): а) об'єм вироблення на попередній операції (Q_i, m^3) Менше об'єму вироблення машин на наступній операції (Q_s, m^3), ($Q_i < Q_s$); б) об'єм вироблення на попередній операції більше об'єму вироблення машин на наступній операції ($Q_i > Q_s$).

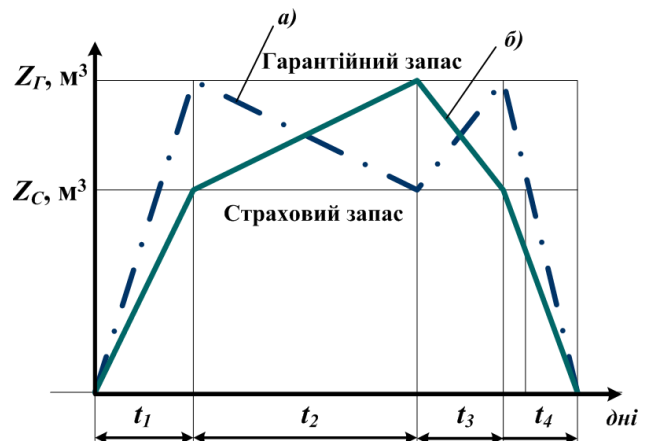


Рис. 2. Зміна запасів у розрахунковому періоді: а) при $Q_i < Q_s$; б) при $Q_i > Q_s$.

Fig. 2. Change in inventories in the calculation period: а) for $Q_i < Q_s$; б) for $Q_i > Q_s$.

В першому випадку, за час t_1 (змін) відбувається створення гарантійного запасу машинами з продуктивністю $Q_i (m^3)$. В інтервалі t_2 (змін) відбувається виконання двох операцій виробничого процесу (i, s). Так як $Q_i < Q_s$, то запас швидше споживається, ніж поповнюється.

У підсумку [26], рівень запасу знижується до страхової величини. Подальше зниження величини запасу допустити не можна, так як зменшаться вимоги техніки безпеки. Тому, на «відстаючій» i -тій операції відбувається підключення додаткових машин для лісотехнічних робіт і рівень запасу збільшується до гарантійного протягом часу t_3 (змін). За період t_4 (змін) відбувається вироблення запасу технічними засобами наступної операції з об'ємом вироблення $Q_s (m^3)$, коли машини попередньої операції переходять до участі в іншому виробничому процесі.

У другому випадку, за час t_1 (змін) відбувається створення страхового запасу технічними засобами попередньої операції з об'ємом вироблення $Q_i (m^3)$. В інтервалі t_2 (змін) відбувається виконання двох операцій виробничого процесу (i, s). Так як $Q_i > Q_s$, то запас швидше поповнюється, ніж споживається. У підсумку, рівень запасу підніметься до гарантійної величини. Подальше збільшення запасу небажано, так як технічні засоби на «відстаючій» s -тій операції НЕ будуть справлятися з його споживанням. До цієї операції відбувається підключення додаткових машин,

і рівень запасу знижується до страхового протягом часу t_3 (змін). За період t_4 (змін) відбувається вироблення запасу технічними засобами з об'ємом вироблення Q_s (м³) [].

Досліджуваний виробничий процес буде залежати від параметрів технічних засобів (кількість, продуктивність, стан), об'ємів міжопераційних запасів, вільних площ, призначених для їх зберігання, штату підприємства. Підвищити ефективність виробничих процесів можна шляхом визначення оптимальних режимів їх функціонування. Для цього необхідно забезпечити узгодженість названих параметрів і вибрати найкращий варіант в даних виробничих умовах. Визначити параметри оптимального виробничого процесу можна, вибравши ефективні методи дослідження.

Мета досліджень

Мета досліджень – вдосконалення методики обчислювального експерименту, математичного моделювання та чисельних методів оптимізації для практичного застосування до планування виробничих процесів зі змінним складом устаткування машин для лісотехнічних робіт.

Результати досліджень

Пропонується методика по проведенню та аналізу результатів обчислювальних експериментів, заснована на положеннях теорії планування експериментів, регресійному аналізі.

1. Побудова математичної моделі досліджуваного виробничого процесу.

$$Z(z_1, z_2, \dots, z_n) \rightarrow \min(\max) \quad (5)$$

$$Q(q_1, q_2, \dots, q_m) \geq 0 \quad (6)$$

$$G(g_1, g_2, \dots, g_m) = 0 \quad (7)$$

де Z – цільова функція, що описує виробничий процес;
 Q, G – обмеження математичної моделі, що відповідають специфіці досліджуваного процесу.

За основу в дослідженнях візьмемо паралельно-послідовний виробничий процес з підтриманням об'єму запасів між двома фіксованими рівнями. Для кожної пари операцій визначається рівень страхового і гарантійного запасу. Відмінною особливістю організації виробничого процесу буде підключення додаткового обладнання на операціях, виконуваних технічними засобами з продуктивністю, відмінною від максимальної в комплекті. За допомогою математичної моделі відбувається визначення значень вихідних параметрів, тобто натурні експерименти замінюються на обчислювальні.

2. Визначення факторного простору експерименту.

На перебіг досліджуваного процесу впливають різні величини. Їх безліч можна розділити на наступні підмножини:

а) Керуючі фактори, значення яких можна змінювати в ході дослідження і встановлювати на заданому рівні ($X_i, i = \overline{1, n}$).

б) Параметри моделі, значення яких знаходяться в певному діапазоні, дослідник не може вплинути на їх зміну, але має можливість зафіксувати прийняті ними значення в різних умовах. Вони змінюються залежно від умов протікання виробничого процесу, використовуюваного обладнання, ресурсів. Наприклад, зміна вироблення машин в залежності від природно-виробничих умов функціонування ($\bar{X}_j, j = \overline{1, m}$).

с) Некеровані зовнішні впливи, вплив яких на функцію відгуку невідомо, але його слід врахувати ($V_l, l = \overline{1, p}$).

д) Величини, які мають постійні значення в рамках досліджуваного процесу ($C_k = \text{const}, k = \overline{1, r}$).

Досліднику слід провести аналіз цих величин і вибрати з них керуючі фактори. Для них слід визначити області варіювання.

3. Визначення області планування експерименту. Фактори можуть варіюватися на двох і більше рівнях. При визначенні рівнів факторів дотримуються наступних рекомендацій [4]: врахування принципових обмежень на значення факторів, на рівні факторів будуть впливати техніко-економічні міркування, особливості умов проведення експериментів. Залежно від особливостей досліджуваного процесу, експериментатор визначає кількість рівнів факторів і їх значення.

Приклад для трьох рівнів представлений в таблиці 1.

Таблиця 1. Нормалізація факторів експерименту.

Table 1. Normalization of experimental factors.

Рівні факторів	X_1		X_2		X_i		X_n	
	рівні	нормалізація	рівні	нормалізація	рівні	нормалізація	рівні	нормалізація
верхній	X_{1+}	+1	X_{2+}	+1	X_{i+}	+1	X_{n+}	+1
нульовий	X_{10}	0	X_{20}	0	X_{i0}	0	X_{n0}	0
нижній	X_{1-}	-1	X_{2-}	-1	X_{i-}	-1	X_{n-}	-1

4. Складання матриці планування експерименту для побудови квадратичної регресійної моделі.

5. Для підвищення надійності і відтворюваності експерименту, можливості проведення наступного статистичного аналізу при розрахунку значень вихідного параметра слід проводити паралельні досліди в точках матриці плану. Вони визначають узгодженість результатів при повторному проведенні експерименту в схожих умовах.

Проведення паралельних дослідів може виявитися складним. У разі натурних експериментів складний підбір схожих природно-виробничих умов, неприпустимо нераціональне використання ресурсів і дорогого устаткування. При проведенні комп'ютерних обчислювальних експериментів, очевидно, що повторний розрахунок вихідного параметра при тому ж наборі вхідних НЕ призведе до його зміни. Виникає запитання моделювання паралельних дослідів при проведенні комп'ютерних експериментів.

Нами пропонується організувати умовно-паралельні досліди. У них варіюються вхідні

параметри моделі, значення яких знаходяться в певному діапазоні, і дослідник не може вплинути на їх зміну, але має можливість зафіксувати прийняті ними значення в різних умовах. Їм будуть відповідати експерименти, в яких для кожної точки матриці плану визначається вихідний параметр із врахуванням зміни параметрів $\tilde{X}_j, j = \overline{1, m}$. Значення $\tilde{X}_j, j = \overline{1, m}$, задаються дослідником. Штучно змінюючи значення параметрів даного класу, будуть отримані різні значення відгуку в даній точці плану, які можна прийняти як результати паралельних дослідів. Таким чином, моделюється варіабельність параметрів, що має місце в реальності. Альтернативним способом організації умовно-паралельних дослідів є генерація відповідних значень за допомогою датчиків випадкових чисел. Проводиться генерація значень, необхідних для проведення умовно-паралельних дослідів, із врахуванням статистичних даних про можливі зміни значень параметрів під впливом випадкових факторів. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип рандомізації.

Кожен j -й паралельний досвід в i -й точці плану відповідає поєднанню природно-виробничих умов,

тобто поєднанню якісних і кількісних характеристик, що впливають на параметри математичної моделі. Можливість проведення експерименту в i -й точці плану при природно-виробничих умовах, відповідних j -му паралельному досліді, може бути оцінена за допомогою ймовірностей p_{ij} . В реальних задачах часто є апіорна інформація, що дозволяє оцінити і використовувати розподіл ймовірностей p_{ij} . Врахування ймовірності виконання одного з серії паралельних дослідів в даній точці плану внесе зміни в побудову і аналіз регресійних моделей.

Якщо ймовірності або інші статистичні характеристики аргументів не задані, хоча самі аргументи є випадковими величинами, то рекомендується задаватися (на підставі апіорної інформації) законом розподілу ймовірностей. При відсутності потрібної інформації слід вважати ймовірності однаковими в разі дискретної випадкової величини або приймати рівномірний закон в разі безперервної.

Результати експерименту із врахуванням ймовірностей умовно-паралельних дослідів зручно представити у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2. Шаблон оформлення результатів комп'ютерного експерименту із врахуванням ймовірностей поєднання природно-виробничих умов.

Table 2. Template for the design of the results of a computer experiment, taking into account the probabilities of combining natural production conditions.

№ дослідів	Керовані фактори				Умовно-паралельні дослідів із врахуванням ймовірностей				Вихідний параметр
	X_1	X_2	...	X_n	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	...	$\tilde{X}_m$	Y
1	1	1	...	1	$\tilde{Y}_{11}$	$\tilde{Y}_{12}$	...	$\tilde{Y}_{1m}$	$Y_1 = \sum_{j=1}^m \tilde{Y}_{1j} \cdot p_{1j}$
					p_{11}	p_{12}	...	p_{1m}	$\sum_{j=1}^m p_{1j} = 1$
2	1	1	...	0	$\tilde{Y}_{21}$	$\tilde{Y}_{22}$	...	$\tilde{Y}_{2m}$	$Y_2 = \sum_{j=1}^m \tilde{Y}_{2j} \cdot p_{2j}$
					p_{21}	p_{22}	...	p_{2m}	$\sum_{j=1}^m p_{2j} = 1$
...									

6. У кожній точці матриці плану визначається математичне сподівання цільової функції по умовно-паралельним дослідів.

Необхідно розрахувати значення. З причини особливостей проведення виробничих процесів на аргументи математичної моделі (5) накладаються обмеження (6, 7), які будуть враховані і в комп'ютерній моделі. При проведенні комп'ютерного експерименту із врахуванням умовно-паралельних дослідів деякі з них можуть надати неприпустимі в зв'язку з порушенням умов математичних моделей, закладених в дослідженнях.

Внаслідок буде отримана матриця плану, що містить неприпустимі дослідів і точки.

Під умовно-неприпустимими дослідів будемо розуміти окремі умовно-паралельні дослідів, в яких не може бути визначено значення функції відгуку за

допомогою математичних моделей, що описують розглянутий виробничий процес. Дані дослідів визначаються тільки в ході проведення комп'ютерного експерименту. Під неприпустимою точкою плану будемо розуміти таку точку, в якій всі умовно-паралельні дослідів виявилися неприпустимими. Наявність умовно-неприпустимих дослідів в точках матриці плану визначає експеримент з нерівномірним дублюванням дослідів.

В літературі, присвяченій теорії планування експерименту не надаються рекомендації щодо проведення дослідів в разі наявності неприпустимих точок плану (розділ 1). Нами пропонується в ситуації, що склалася використовувати один з варіантів:

а) Виключити неприпустимі точки з плану експерименту.

б) Оцінити наближено верхню межу значення функції відгуку (якщо вирішується завдання мінімізації) без використання математичних моделей (5)-(7). Дані значення включити в матрицю планування експерименту.

Перший варіант рекомендується використовувати в ситуаціях, коли число допустимих дослідів значно переважає над числом неприпустимих і виключення останніх не призведе до зміни структури матриці

плану. Другий варіант придатний в тих випадках, коли існують альтернативні способи розрахунку значень функції відгуку, наприклад з використанням спрощених математичних моделей.

Результати проведення експериментів з умовно-паралельними дослідями і з рівними можливостями умовно-паралельних дослідів в точці плану можна представити у вигляді таблиці 3.

Таблиця 3. Шаблон оформлення результатів експерименту із врахуванням умовно-неприпустимих дослідів і з рівними можливостями умовно-паралельних дослідів у точці плану.

Table 3. The template for the design of the results of the experiment, taking into account the conditionally inadmissible experiments and with equal opportunities for conditionally parallel experiments at the point of the plan.

№ досліду	Керовані фактори				Умовно-паралельні дослідів із врахуванням ймовірності				Вихідний параметр
	X_1	X_2	...	X_n	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	...	$\tilde{X}_m$	Y
1	1	1	...	1	$\tilde{Y}_{11}$	$\tilde{Y}_{12}$	...	$\tilde{Y}_{1m}$	$Y_1 = \frac{\sum_{j=1}^m \tilde{Y}_{1j}}{m}$
2	1		...	0	—	—	...	—	—
3	1	1	...	-1	$\tilde{Y}_{31}$	$\tilde{Y}_{32}$	...	—	$Y_3 = \frac{\sum_{j=1}^m \tilde{Y}_{3j}}{m}$
...									

Внаслідок буде проведений багатофакторний експеримент із нерівномірним дублюванням паралельних дослідів в точках плану. В даному випадку для розрахунку коефіцієнтів функції відгуку необхідно використовувати зважений метод найменших квадратів. Якщо ймовірності або інші статистичні характеристики аргументів не задані, хоча самі аргументи, як правило, є випадковими величинами, то рекомендується задаватися (на підставі апріорної інформації) законом розподілу ймовірностей. При відсутності потрібної інформації вважати ймовірності однаковими в разі дискретної випадкової величини або приймати рівномірний закон в разі безперервної.

Висновки

1. Рекомендується враховувати можливі відмінності ймовірностей p_{ij} , j -го умовно-паралельного досвіду в i -й точці плану. Ймовірності можуть бути задані на підставі апріорної інформації про досліджуваному процесі. Значення для організації умовно-паралельних дослідів згенеровані за допомогою датчика випадкових чисел. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип рандомізації. Питання про вибір одного із способів вимагає опрацювання для конкретних завдань.

2. Результати, отримані при проведенні обчислювальних експериментів для лісозаготівельних процесів, незначно відрізняються один від одного, рекомендується використовувати підхід з рівними можливостями умовно-паралельних дослідів.

3. Удосконалено чисельний метод оптимізації, рекомендований для вирішення задач умовної оптимізації при виявленні умовно-неприпустимих дослідів і точок плану обчислювального експерименту.

Список літератури

1. Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B. Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 17. P. 1166-1172.
2. Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F. Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal. 2017. Vol. 19. P. 158-163.
3. Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I. Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters. 2018. Vol. 16. P. 79-84.
4. Masek J., Novak P., Jasinskas A. Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. Proceedings of 16th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16. P. 1180-1185.
5. Rogovskii I., Grubrin O. Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of APK. Kyiv, Ukraine. 2018. Vol. 298. P. 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.
6. Viba J., Lavendelis E. Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. P. 95-98.
7. Luo A.C.J., Guo Y. Vibro-impact Dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 213 p.
8. Astatheev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. Proceedings of 16th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava,

Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16. P. 108-113.

9. *Zagurskiy O., Ohienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I.* Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 2018. P. 64-74.

10. *Drga R., Janacova D., Charvatova H.* Simulation of the PIR detector active function. Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016), July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf Bp 112, F-91944 Cedex A, France, Vol. 76. UNSP 04036.

11. *Novotny J.* Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. Proceedings of 15th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23-25, 2016, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15. P. 16-20.

12. *Pinzi S., Cubero-Atienza A. J., Dorado M. P.* Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. Journal of Sound and Vibration. 2016. Vol. 266. Issue 3. P. 407-441.

13. *Rogovskii I. L.* Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10. No 3. P. 181-187.

14. *Rogovskii I. L.* Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10. No 4. P. 145-150.

15. *Роговський І. Л.* Алгоритмічність визначення періодичності відновлення працездатності сільськогосподарських машин за ступенем витрат їх ресурсу. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 1. P. 155-162.

16. *Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V.* Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. Engineering for Rural Development. 2019. Vol. 18. P. 291-298.

17. *Kalinichenko D., Rogovskii I.* Decision for technical maintenance of combine harvesters in system of RCM. MOTROL. An International Quarterly Journal on Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin. 2017. Vol. 19. No 3. P. 179-184.

18. *Kalinichenko D., Rogovskii I.* Modeling technology in centralized technical maintenance of combine harvesters. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2017. Lublin–Rzeszów. Vol. 17. No 3. P. 93-102.

19. *Kalinichenko D., Rogovskii I.* Method for determining time of next maintenance of combine harvesters. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2018. Lublin–Rzeszów. Vol. 18. No 1. P. 105-115.

20. *Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.* Аналіз систем і стратегій технічного обслуговування

зернозбиральних комбайнів та їх складових частин. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 258. С. 380–390.

21. *Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.* Штучні когнітивні системи в процесах технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 262. С. 353–361.

22. *Rogovskii I. L.* Probability of preventing loss of efficiency of agricultural machinery during exploitation. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 258. С. 399-407.

23. *Роговський І. Л.* Методологічність виконання технологічних операцій відновлення працездатності сільськогосподарських машин при обмежених ресурсах. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2015. Вип. 212. Ч. 1. С. 314–322.

24. *Rogovskii Ivan.* Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. MOTROL. Lublin. 2016. Vol. 18. No 3. P. 155–164.

25. *Роговський І. Л.* Модель стохастичного процесу відновлення працездатності сільськогосподарської машини в безінерційних системах із запізненням. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 3. P. 143–150.

26. *Тітова Л. Л.* Моделювання перехідних процесів динамічної моделі силової енергетичної установки машин для лісотехнічних робіт. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 147-154.

References

1. *Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B.* (2018). Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. 17. 1166-1172.
2. *Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F.* (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal. 19. 158-163.
3. *Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I.* (2018). Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters. 16. 79-84.
4. *Masek J., Novak P., Jasinskas A.* (2017). Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. Proceedings of 16th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia

- University of Agriculture. Faculty of Engineering. 16. 1180-1185.
5. Rogovskii I., Grubrin O. (2018). Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of APK*. Kyiv, Ukraine. 298. 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.
 6. Viba J., Lavendelis E. (2006). Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In *Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME*, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. 95-98.
 7. Luo A.C.J., Guo Y. (2013). *Vibro-impact Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag. 213.
 8. Astashev V., Krupenin V. (2017). Efficiency of vibration machines. *Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”*. Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. 16. 108-113.
 9. Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. (2018). Global supply chain in context of new model of economic growth. *Conceptual bases and trends for development of social-economic processes*. Monograph. Opole. Poland, 64-74.
 10. Drga R., Janacova D., Charvatova H. (2016). Simulation of the PIR detector active function. *Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016)*, July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf Bp 112, F-91944 Cedex A, France, 76, UNSP 04036.
 11. Novotny J. (2016). Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. *Proceedings of 15th International Scientific Conference “Engineering for rural development”*. Jelgava, Latvia, May 23-25, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. 15. 16-20.
 12. Pinzi S., Cubero-Atienza A.J., Dorado M.P. (2016). Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. *Journal of Sound and Vibration*, 266 (3). 407-441.
 13. Rogovskii I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 10(3). 181-187.
 14. Rogovskii I. L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 10(4). 145-150.
 15. Rogovskii I. L. (2020). Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(1). 155-162.
 16. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 18. 291-298.
 17. Kalinichenko D., Rogovskii I. (2014). Decision for technical maintenance of combine harvesters in system of RCM. *MOTROL. An International Quarterly Journal on Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin. 19(3). 179-184.
 18. Kalinichenko D., Rogovskii I. (2017). Modeling technology in centralized technical maintenance of combine harvesters. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin–Rzeszów. 17(3). 93-102.
 19. Kalinichenko D., Rogovskii I. (2018). Method for determining time of next maintenance of combine harvesters. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 18(1). 105-115.
 20. Kalinichenko D. Yu., Rogovskii, I. L. (2017). Systems analysis and strategies for technical maintenance of combine harvesters and their parts. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kyiv. 258. 380-390.
 21. Kalinichenko D. Yu., Rogovskii, I. L. (2017). Artificial cognitive systems in the processes of technical maintenance of combine harvesters. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kyiv. 262. 353-361.
 22. Rogovskii I. L. (2017). Probability of preventing loss of efficiency of agricultural machinery during exploitation. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kyiv. 258. 399-407.
 23. Rogovskii I. L. (2015). Metodological performance of technological operations of restoration of working capacity of agricultural machines at limited resources. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kyiv. 212(1). 314-322.
 24. Rogovskii Ivan. (2016). Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. *MOTROL*. Lublin. 18(3). 155-164.
 25. Rogovskii I. L. (2020). Model of stochastic process of restoration of working capacity of agricultural machine in inertial systems with delay. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(3). 143–150.
 26. Titova L. L. (2021). Simulation of transitional processes of dynamic model of power energy installation of machines for forestry works. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 147-154.

СПОСОБИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ С ПЕРЕМЕННЫМ СОСТАВОМ
МАШИН ДЛЯ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Л. Л. Тумова

Аннотация. В статье проведено исследование и обобщение способов организации производственных процессов с переменным составом оборудования машин для лесотехнических работ. Планирование вычислительного эксперимента для оптимальной организации производственных процессов с

переменным составом оборудования. Для производственных процессов с переменным составом оборудования машин для лесотехнических работ проведение натурных экспериментов часто становится нерациональным или невозможным из-за сложности организации, больших затрат, ограниченности ресурсов, поэтому происходит замена вычислительными методами, в которых исследованию подлежат математические модели процессов. К настоящему времени разработано большое количество методов математического моделирования, планирования эксперимента, обработки результатов, оптимизации. Их многообразие связано с тем, что для решения, производственных задач различных классов требуется учет различных нюансов, и поэтому необходимо выработать, методы, которые обладали бы достаточной универсальностью. Решение практических задач с помощью аппарата моделирования, планирования эксперимента может быть затруднено нарушением условий применимости методов, сложностью их реализации.

Таким образом, актуальность приведенного исследования в статье обусловлена необходимостью совершенствования методов планирования и обработки результатов компьютерных экспериментов, их адаптации к специфике производственных процессов машин для лесотехнических работ. Эффективность производственных процессов может быть достигнута при правильном составлении комплектов машин по типам, численности и соответствующей организации работы.

Ключевые слова: методика, машины для лесотехнических работ, производственный процесс, производительность.

complicated by infringement of conditions of applicability of methods, complexity of their realization.

Thus, the relevance of this study in the article is due to the need to improve methods of planning and processing the results of computer experiments, their adaptation to the specifics of production processes of machines for forestry work. The efficiency of production processes can be achieved with the correct assembly of sets of machines by type, number and appropriate organization of work.

Key words: methods, machines for forestry works, production process, productivity.

Л. Л. Тітова ORCID 0000-0001-7313-1253.

METHODS OF SEARCHING FOR OPTIMAL PARAMETERS OF PRODUCTION PROCESSES WITH VARIABLE COMPOSITION OF MACHINES FOR FORESTRY TECHNOLOGY

L. L. Titova

Abstract. In the article the research and generalization of ways of the organization of production processes with a variable structure of the equipment of cars for forestry works is carried out. Planning a computational experiment for optimal organization of production processes with variable equipment. For production processes with variable composition of equipment for forestry machinery, field experiments often become irrational or impossible due to the complexity of the organization, high costs, limited resources, so there is a replacement by computational methods, which are subject to mathematical process models. To date, a large number of methods of mathematical modeling, experiment planning, processing of results, optimization have been developed. Their diversity is due to the fact that to solve the production problems of different classes requires consideration of different nuances, and therefore it is necessary to develop methods that would have sufficient versatility. The decision of practical problems by means of the device of modeling, planning of experiment can be