

УДК 621.436: 534.833.004

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ 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 – квітень 2021, акцептовано – серпень 2021, опубліковано – 30 вересня 2021 року.
Бібл. 27, рис. 2, табл. 5.

Анотація. В статті проведено дослідження оптимізації параметрів виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. Методи планування експериментів і оптимізації придатні для комп'ютерного моделювання виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. Для більшості з них багаторазово проводити натурні експерименти неможливо або недоцільно, але в точках плану можна реалізувати обчислювальний експеримент. Попередньо повинна бути сформована математична модель, що дозволяє для заданих сполучень значень обраних на етапі планування експерименту керуючих факторів, отримувати значення функції відгуку. Потім можна використовувати статистичні методи для побудови регресійної моделі, за допомогою якої можна планувати і досліджувати виробничий процес. Зокрема, стає можливим знаходити параметри процесу, що відповідають значенням функції відгуку, близьким до оптимальних.

Математичні моделі, що описують основні параметри лісотехнічного процесу, заснованого на підключенні додаткового обладнання на «відстаючих» операціях. Виникає задача оцінки ефективності лісотехнічних робітного процесу.

Ключові слова: математична модель, оптимізація, параметр, машини для лісотехнічних робіт, виробничий процес, продуктивність.

Постановка проблеми

Сучасне програмне забезпечення для статистичної обробки даних надає користувачеві інструменти для планування експериментів [1], регресійного [2], дисперсійного [3], факторного [4], проведення параметричних [5] і непараметричних процедур [6]. В програмах реалізована велика кількість існуючих статистичних методів в поєднанні із засобами візуалізації даних і створення звітів [7]. Всі програми забезпечені довідковим матеріалом [8].

Серед виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт можна виділити ті [9], які складаються з ряду операцій, для виконання кожної з яких використовуються спеціальні машини та

обладнання [10], причому є можливість варіації складу і черговості виконання виробничих операцій [11], а також обладнання, що використовується [12]. Для ефективної реалізації таких процесів слід визначити види і черговість операцій, а використовуване обладнання розглядати як єдину систему [13]. Процеси подібного виду будемо називати виробничими процесами зі змінним складом устаткування або з варіабельними комплектами обладнання [14].

Варіабельність – мінливість, різноманітність, розкид або міра відхилення від «оптимуму» [15]. Саме зміну називають варіацією або варіантом [16]. Варіабельність, тобто мінливість властива всім природним явищам, всім технічним і технологічним процесам, а також всім відомим організаційним структурам [17].

Аналіз останніх досліджень

Побудова математичної моделі досліджуваного процесу, що дозволяє визначити цільову функцію оптимізації планування лісотехнічних робітних процесів [18]. Лісотехнічних робітні процеси складаються з ряду операцій, між кожною парою суміжних операцій створюються запаси ресурсів [19]. Необхідно визначити режими функціонування комплектів машин так, щоб для кожної пари операцій розмір запасу підтримувався між страховим і гарантійним рівнями [20]. В основу побудови математичних моделей покладено підхід до організації лісотехнічних робітного процесу, заснований на підключенні додаткового обладнання на «відстаючих» операціях [21]. Він дозволяє продуктивність комплексу машин наблизити до продуктивності ведучої машини [22].

При розробці лісотехнічної операції виділяють наступні періоди роботи машин для лісотехнічних робіт: створення запасу (t_1), його поповнення і споживання, до (t_2) і після (t_3) підключення додаткових машин, вироблення запасу (t_4). Лісотехнічних робітні роботи можуть проходити протягом одного місяця, двох і більше [23]. Величина страхового запасу розраховується з врахуванням

характеристик лісотехнічної операції і вимог техніки безпеки [24]. Між валанням і трелюванням повинна дотримуватися п'ятдесятиметрова зона безпеки, а між трелюванням і обрізанням сучків, розкряжуванням і навантаженням – тридцятиметрова (таблиця 2).

У таблиці 2 використані такі умовні позначення:

Z_{Γ} – об'єм гарантійного запасу, м³;

Z_C – об'єм страхового запасу, м³;

Z_{cp} – середній запас деревини на гектарі, м³;

L_{cp} – довжина зони безпеки, при валці

бензопилами - 50 м, при валці машинами – 200..250 м;

B – ширина зони безпеки, м;

Z_{TX} – технологічний об'єм запасу між операціями, м³;

Z_{TH} – технічний об'єм запасу між операціями, м³;
 P_i – змінна продуктивність основних машин на i -й операції, м³;

Q_{max} – максимальний обсяг вироблення машин на одній з операцій, м³;

T_{3M} – тривалість зміни, год.;

$K_{T\Gamma i}, K_{T\Gamma s}$ – коефіцієнти технічної готовності i -ї і s -ї машини відповідно.

Формули для розрахунку часу виконання технологічних операцій представлені в таблиці 3. Більш докладно з процедурою їх виведення можна ознайомитися в джерелах [24, 25].

Таблиця 1. Розрахункові періоди розробки лісосік.

Table 1. Estimated periods of logging development.

Кількість місяців	Місяць	Розрахунковий період розробки лісотехнічної операції (T_{Π} , дні)
Один	перший	$T_{\Pi} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$
Два	перший	$T_{\Pi} = t_1 + t_2 + t_3$
	другий	$T_{\Pi} = t_2 + t_3 + t_4$
Більше двох	перший	$T_{\Pi} = t_1 + t_2 + t_3$
	другий-передостанній	$T_{\Pi} = t_2 + t_3$
	останній	$T_{\Pi} = t_2 + t_3 + t_4$

Таблиця 2. Математичні моделі об'ємів запасів.

Table 2. Mathematical models of inventory volumes.

Вид запасу		Розрахункові формули
Страховий		$Z_C = Z_{TX} + Z_{TH}$
Технологічний між операціями	валка і трелювання	$Z_{TX} = \frac{L_{cp} \cdot B \cdot Z_{cp}}{10000}$
	трелювання і обрізки сучків, обрізки сучків і навантаження	$Z_{TX} = P_i \cdot T_n$
Технічний		$Z_{TH} = Q_{max} \cdot (2 - (K_{T\Gamma i} + K_{T\Gamma s})) \cdot T_{3M}$
Організаційний		$Z_0 = Z_{\Gamma} - Z_C$

Таблиця 3. Математичні моделі режимів роботи машин для лісотехнічних робіт.

Table 3. Mathematical models of operating modes of machines for forestry works.

Розрахунковий період	Порівняння норм вироблення машин на суміжних операціях	Час створення запасу	Час поповнення і споживання запасу	Час роботи додаткових машин	Час вироблення запасу
Перший місяць	$Q_i < Q_s$	$t_1 = \frac{Z_{\Gamma}}{Q_i}$	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_i}$	$t_3 = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_i - Q_{max}) \cdot (Q_{max} - Q_i)}{Q_i \cdot Q_{Di}}$	-
	$Q_i > Q_s$	$t_1 = \frac{Z_C}{Q_i}$	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_s}$	$t_3 = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_{max} - Z_{\Gamma}) \cdot (Q_{max} - Q_s)}{Q_{max} \cdot Q_{Ds}}$	-
Другий-передостанній місяць	$Q_i < Q_s$	-	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_i}$	$t_3 = \frac{T_{\Pi} \cdot (Q_{max} - Q_i)}{Q_{Di}}$	-
	$Q_i > Q_s$	-	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_s}$	$t_3 = \frac{T_{\Pi} \cdot (Q_{max} - Q_i)}{Q_{Ds}}$	-
Останній місяць	$Q_i < Q_s$	-	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_i}$	$t_3 = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_{max} - Z_{\Gamma}) \cdot (Q_{max} - Q_i)}{Q_{max} \cdot Q_{Di}}$	$t_4 = \frac{Z_{\Gamma}}{Q_s}$
	$Q_i > Q_s$	-	$t_2 = \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{max} - Q_s}$	$t_3 = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_s - Z_{\Gamma}) \cdot (Q_{max} - Q_s)}{Q_s \cdot Q_{Ds}}$	$t_4 = \frac{Z_C}{Q_s}$

Умовні позначення:

$i(s)$ - номер попередньої (наступної) операції;

$Q_{\max}, (Q_{\min})$ - максимальний (мінімальний) обсяг вироблення машин для лісотехнічних робіт на одній з операцій, m^3 ;

$Q_i (Q_i = P_i \cdot N_i \cdot S)$ - обсяг вироблення основних машин для лісотехнічних робіт на i -й операції, m^3 ;

$Q_s (Q_s = P_s \cdot N_s \cdot S)$ - обсяг вироблення основних машин для лісотехнічних робіт на s -й операції, m^3 ;

$Q_i^D = Q_i + Q_{Di}$ - рівень, до якого збільшується обсяг вироблення (Q_i) на i -й операції після

підключення додаткової машини з обсяг вироблення Q_{Di} , m^3 ;

$Q_s^D = Q_s + Q_{Ds}$ - рівень, до якого збільшується обсяг вироблення (Q_s) на s -й операції після підключення додаткової машини з обсяг вироблення Q_{Ds} , m^3 .

Висновок математичних моделей для розрахунку об'ємів гарантійних запасів (таблиця 4) заснований на використанні виразів таблиць 1, 3 [26, 27].

Таблиця 4. Математичні моделі об'єму гарантійного запасу машин для лісотехнічних робіт.

Table 4. Mathematical models of the warranty stock of machines for forestry work.

Розрахунковий період лісотехнічних робіт	Порівняння норм вироблення машин на суміжних операціях	Граничний запас, із врахуванням максимального вироблення комплексу машин для лісотехнічних робіт
Перший місяць	$Q_i < Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{[T_{\Pi} \cdot (Q_i^D - Q_{\max}) \cdot (Q_{\max} - Q_i) + Z_C \cdot Q_i] \cdot Q_{Di}}{(Q_i^D - Q_{\max}) \cdot (Q_{\max} - Q_i) + Q_i \cdot Q_{Di}}$
	$Q_i > Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_{\max} - Z_C) \cdot (Q_{\max} - Q_s) \cdot (Q_s^D - Q_{\max}) + Z_C \cdot Q_{\max} \cdot Q_{Ds}}{Q_{\max} \cdot Q_{Ds}}$
Другий-передостанній місяць	$Q_i < Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{T_{\Pi} \cdot (Q_{\max} - Q_i) \cdot (Q_i^D - Q_{\max}) + Z_C \cdot Q_{Di}}{Q_{Di}}$
	$Q_i > Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{T_{\Pi} \cdot (Q_{\max} - Q_s) \cdot (Q_s^D - Q_{\max}) + Z_C \cdot Q_{Ds}}{Q_{Ds}}$
Останній місяць	$Q_i < Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{Q_{\max} \cdot [T_{\Pi} \cdot (Q_{\max} - Q_i) \cdot (Q_i^D - Q_{\max}) + Z_C \cdot Q_{Di}]}{(Q_{\max} - Q_i) \cdot (Q_i^D - Q_{\max}) + Q_{\max} \cdot Q_{Di}}$
	$Q_i > Q_s$	$Z_{\Gamma} = \frac{(T_{\Pi} \cdot Q_s - Z_C) \cdot (Q_{\max} - Q_s) \cdot (Q_s^D - Q_{\max}) + Z_C \cdot Q_s \cdot Q_{Ds}}{Q_s \cdot Q_{Ds}}$

При складанні таблиці 4 використовувалися умовні позначення:

P_a - змінна продуктивність машин на вивезенні, m^3 ;

N_i, N_s - число основних машин (на i -й і s -й операціях);

P_i, P_s - змінна продуктивність основних машин на i -й і s -й, m^3 ; N_{Di} - число додаткових машин;

P_{Di} - змінна продуктивність додаткової машини, m^3 .

Мета досліджень

Мета досліджень - оптимізація параметрів виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт.

Результати досліджень

Використовуючи формули, представлені в таблицях 1-4, відбувається визначення режимів роботи комплектів машин для лісотехнічних робіт, організація лісотехнічних робітного процесу протягом декількох місяців, яка дозволяє знизити тривалість виконання робіт до 30%. У разі невеликих об'ємів лісотехнічних робіт і маленьких розмірів лісосік, їх розробку можна

виконати протягом одного місяця. Тому потрібна була розробка математичних моделей при плануванні лісосічних робіт на один місяць. Розрахунок страхового запасу слід виконувати за математичними моделями таблиці 2, а розрахунок режимів роботи машин по залежностям таблиці 1. Для розрахунку об'ємів гарантійних запасів необхідно побудувати відповідні моделі для двох можливих варіантів ($Q_i = Q_{\max}$ і $Q_s = Q_{\max}$).

Перший варіант. Продуктивність машини на поточній (i) операції більше, ніж продуктивність машини наступного (s) операції ($Q_i > Q_s$ або $Q_i = Q_{\max}$).

Розрахунковий період буде дорівнює:

$$T_{\Pi} = \frac{Z_C}{Q_{\max}} + \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_{\max} - Q_s} + \frac{Z_{\Gamma} - Z_C}{Q_s^D - Q_{\max}} + \frac{Z_C}{Q_s} \quad (1)$$

Визначимо із виразу (1) величину гарантійного запасу

$$Z_{\Gamma} = \frac{Z_C \cdot Q_{Ds} \cdot Q_s \cdot Q_{\max} + (T_{\Pi} \cdot Q_s \cdot Q_{\max} - Z_C)(Q_{\max} + Q_s)(Q_{\max} - Q_s)(Q_s^D - Q_{\max})}{Q_{Ds} \cdot Q_s \cdot Q_{\max}} \quad (2)$$

Другий варіант. Продуктивність машини для лісотехнічних робіт на поточній (i) операції менше, ніж продуктивність машини для лісотехнічних робіт наступної (s) операції ($Q_i < Q_s$ або $Q_s = Q_{\max}$). Провівши міркування, аналогічні варіанту 1, отримуємо:

$$Z_{\Gamma} = \frac{Q_i Q_{\max} (T_{\Pi} (Q_{\max} - Q_i) (Q_i^D - Q_{\max}) + Z_c \cdot Q_{Di})}{(Q_{\max} - Q_i) (Q_i^D - Q_{\max}) (Q_{\max} + Q_i) + Q_i \cdot Q_{\max} \cdot Q_{Di}} \quad (3)$$

Математичні моделі, що описують основні параметри лісотехнічних робітного процесу, заснованого на підключенні додаткового обладнання на «відстаючих» операціях. Виникає задача оцінки ефективності лісотехнічного процесу. При її вирішенні можна використовувати різні критерії: час виконання процесу, тривалість роботи машин на операціях, час роботи з підключенням додаткового устаткування і т.п. Велика частина з них визначається при плануванні лісотехнічних робіт. Якщо для оцінки використовувати економічні показники, то необхідно розрахувати витрати. Вони тісно пов'язані з витратами на паливно-мастильні матеріали, які, в свою чергу, безпосередньо залежать від енерговитрат, тобто від потужності машин і часу функціонування машин для лісотехнічних робіт.

Узагальнена формула для розрахунку часу T_{Π} роботи машин для лісотехнічних робіт на операції має вигляд:

$$T_{\Pi}^i = \begin{cases} t_1^{(i)} [1] + \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)}, \text{ якщо } i = 1 \\ t_1^{(i)} [1] + \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)} + t_4^{(i)} [M], \text{ якщо } i = \overline{2, N-1} \\ \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)} + t_4^{(i)} [M], \text{ якщо } i = N \end{cases} \quad (4)$$

де i, s – номери лісотехнічних операцій, $s = i + 1$;

j – номер місяця розробки лісотехнічних робіт;

M – число місяців в розрахунковому періоді;

N – число лісотехнічних операцій;

$t_1^{(i)} [1]$ – час створення запасу на i -й операції в першому розрахунковому місяці, змін;

$t_{2[j]}^{(i-s)}$ – час поповнення, споживання запасу між i -ю і s -ю операціями без підключення додаткового обладнання в j -у розрахунковому місяці, змін;

$t_{3[j]}^{(i-s)}$ – час поповнення, споживання запасу між i -ю і s -ю операціями з підключенням додаткового устаткування в j -у розрахунковому місяці, змін;

$t_4^{(i)} [M]$ – час вироблення запасу на s -й операції в останньому розрахунковому місяці, змін.

Сумарний час роботи лісотехнічних машин протягом усього періоду розробки лісотехнічної операції T_{Π} , днів складе:

$$T_{\Pi} = \sum_{i=1}^{N-1} t_1^{(i)} [1] + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} (t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)}) + \sum_{i=2}^N t_4^{(i)} [M] \quad (5)$$

Тривалість робіт на парах суміжних операцій однакова і дорівнює часу розрахункового періоду, який визначається при плануванні лісотехнічних робіт. Час початку виконання технологічних операцій буде зміщено на увазі необхідність створення страхових і гарантійних запасів. На рис. 1 представлено зміщення часу початку виконання лісотехнічних операцій протягом одного місяця.

№ лісотехнічної операції

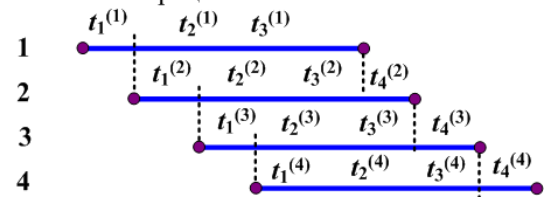


Рис. 1. Режими виконання лісотехнічних операцій при одному розрахунковому місяці.

Fig. 1. Modes of execution of forestry operations at one settlement month.

На підставі схеми, представленої на рисунку 1, отримані математичні моделі часу закінчення лісотехнічних операцій відносного початкового періоду розробки лісотехнічної операції (таблиця 5).

Таблиця 5. Математичні моделі часу закінчення лісотехнічних операцій при декількох розрахункових місяцях.

Table 5. Mathematical models of time of completion of forestry operations at several settlement places.

№ операції	Проміжок часу від початку розробки лісотехнічної операції, через який операція буде завершена
1	$T^{(1)} = t_1^{(1)} + \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(1)} + t_{3[j]}^{(1)}$
2	$T^{(2)} = t_1^{(1)} + t_1^{(2)} + \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(2)} + t_{3[j]}^{(2)} + t_4^{(2)} = T_{\Pi} + t_4^{(2)}$
3	$T^{(3)} = t_1^{(1)} + t_1^{(2)} + t_1^{(3)} + \sum_{j=1}^M t_{2[j]}^{(3)} + t_{3[j]}^{(3)} + t_4^{(3)} = T_{\Pi} + t_4^{(2)} + t_4^{(3)}$
4	$T^{(4)} = t_1^{(1)} + t_1^{(2)} + t_1^{(3)} + t_1^{(4)} + \sum_{j=1}^M (t_{2[j]}^{(4)} + t_{3[j]}^{(4)}) + t_4^{(4)} = T_{\Pi} + t_4^{(2)} + t_4^{(3)} + t_4^{(4)}$

Умовні позначення таблиці 5:

$T^{(i)}$ – кількість днів від початку розробки лісотехнічної операції до закінчення i -ї операції, $i = \overline{1, 4}$;

$t_1^{(i)}$ – час створення запасу на i -й операції, змін, $i = \overline{1, 4}$;

$t_{2[j]}^{(i)}$ – час поповнення, споживання запасу на i -й операції без підключення додаткового обладнання в j -у розрахунковому місяці, змін, $i = \overline{1, 4}$;

$t_{3[j]}^{(i-s)}$ – час поповнення, споживання запасу на i -й операції з підключенням додаткового устаткування в j -у розрахунковому місяці, змін, $i = \overline{1, 4}$;

$t_4^{(i)}[M]$ – час вироблення запасу на i -й операції в останньому розрахунковому місяці, змін, $i = \overline{1, 4}$.

Узагальнена формула для розрахунку проміжку часу від початку розробки лісотехнічної операції до закінчення поточної операції матиме вигляд:

$$T^{(i)} = \sum_{i=1}^N t_1^{(i)} + \sum_{i=1}^M (t_{2[j]}^{(i)} + t_{3[j]}^{(i)}) + t_4^{(i)} \quad (6)$$

Знаючи тривалість роботи машин на лісотехнічних операціях, можна знайти енерговитрати. Енерговитрати машин на i -й операції E_{ci} , кВт:

$$E_{ci} = W_i \cdot T_{\Pi}^{(i)} \quad (7)$$

де W_i – потужність двигуна лісозаготівельної машини на i -й операції, кВт.

Енерговитрати машин за весь період розробки лісотехнічної операції E_c , кВт:

$$E_c = \sum_{i=1}^N W_i \cdot T_{\Pi}^{(i)} \quad (8)$$

Отримані детерміновані аналітичні математичні моделі лісозаготівельних процесів дозволяють визначати цільову функцію експерименту. Виконаємо постановку задачі оптимізації лісотехнічних робіт. Кожна машина, яка виконує технологічні операції, має свої експлуатаційні характеристики, може виконувати одну або кілька операцій. Парк машин підприємства обмежений. Їх необхідно розподілити за операціями, щоб процес лісотехнічних робіт був оптимальним. Розміщення технічних засобів за технологічними операціями визначається видом операції (B, C, T, P), числом машин (N_m, N_d), Продуктивністю машин (P_m, P_d). У підсумку, буде визначена функція розподілу технічних засобів за операціями лісотехнічних робіт:

$$F_1 = f_1(N_m, N_d, P_m, P_d) \quad (9)$$

Графіки роботи для операторів машин залежать від специфіки підприємства. Визначається число змін роботи (S), тривалість зміни (tsm), число робочих днів у місяці (D), число працівників в зміні (chs). Функцію для складання графіків роботи робочих задамо у вигляді:

$$F_2 = f_2(S, tsm, D, chs) \quad (10)$$

Розрахунок розмірів страхового (Q_1) і гарантійного запасу (Q_2) залежить від вимог техніки безпеки, характеристик лісотехнічної операції (Q_z, Z_{cp}, L_{cp}), продуктивності машин (P_d, P_m), числа робочих днів (D). Отримуємо функції для розрахунку величин запасів:

$$Q_1 = q_1(Q_z, Z_{cp}, L_{cp}), \quad Q_2 = q_2(Q_1, P_d, P_m, D) \quad (11)$$

Необхідно так розподілити машини по операціям лісотехнічного процесу F_1 , визначити графіки роботи F_2 , розрахувати розміри запасів Q_1, Q_2 , щоб об'єм вироблення Q був максимальним, час (T) виконання всього процесу і енерговитрат (Z) були мінімальні. Цільові функції завдання, що визначають параметри виробничого процесу лісотехнічних робіт мають вигляд:

$$\begin{cases} Q = q(F_1, F_2, Q_1, Q_2) \rightarrow \max, \\ T = t(F_1, F_2, Q_1, Q_2) \rightarrow \min, \\ Z = z(F_1, F_2, Q_1, Q_2) \rightarrow \min \end{cases} \quad (12)$$

Введемо функції, що задають обмеження завдання.

В залежності від характеристики лісотехнічної операції:

$$G_1 = g_1(Q_z, Z_{cp}, L_{cp}). \quad (13)$$

В залежності від штату операторів машин:

$$G_2 = g_2(N_{cm}, S, D). \quad (14)$$

В залежності від кліматичних умов:

$$G_3 = g_3(P_a, P_d, P_m). \quad (15)$$

Залежно від парку технічних засобів:

$$G_4 = g_4(P_a, P_d, P_m, N_m, N_d). \quad (16)$$

Керуючі параметри пов'язані:

$$U = u(S, N_m, N_d, M). \quad (17)$$

Завдання ставиться до багатокритеріальної багатовимірної умовної оптимізації. В якості цільових функцій можуть виступати максимізація об'ємів вироблення, мінімізація часу роботи машин для лісотехнічних робіт, витрат на виконання операцій. У даній статті пропонується звести задачу багатокритеріальної оптимізації до задачі умовної однокритеріальної за допомогою методу головного критерію [49].

Мінімізувати:

$$Z = z(F_1, F_2, Q_1, Q_2) \quad (18)$$

при обмеженнях:

$$G_4 = g_4(P_a, P_d, P_m, N_m, N_d) \quad (19)$$

керуючих параметрах:

$$U = u(S, N_m, N_d, M) \quad (20)$$

Для вирішення поставленого завдання скористаємося комп'ютерним експериментом, методами оптимізації функцій відгуку.

Відповідно до методики комп'ютерного експерименту [22], після вибору цільової функції, виконаного в попередньому пункті, слід виділити основні елементи факторного простору. Виділимо величини, що впливають на лісотехнічні процеси. Керуючими факторами є: число змін роботи і кількість машин для лісотехнічних робіт. Параметри процесів, значення яких не можуть бути змінені дослідниками, але є можливість їх фіксації: продуктивність, потужність двигуна машин для лісотехнічних робіт, середній об'єм хлиста на лісосіці, середня відстань трелювання, вид лісових насаджень. Некеровані зовнішні впливи: величина снігового покриву та інші природно-кліматичні явища, технічний стан парку машин, людський фактор. Постійні величини в рамках дослідження: загальний запас на лісотехнічній операції, середній запас деревини на гектарі, довжина зони вирубки.

Факторний простір буде складатися з наступних підмножин:

$$X_i = \{N_i, N_{di}, S_i\} \quad (21)$$

$$\tilde{X}_j = \{P_a, P_i, P_{di}, V_s, L_t\} \quad (22)$$

$$V_l = \{V_1, V_2, \dots\} \quad (23)$$

$$C_k = \{Q_z, Z_{cp}, L_{cp}\} \quad (24)$$

де N_i – число основних машин на i -й операції;

N_{di} – число додаткових машин на i -й операції;

S_i – число змін роботи машин;

P_a – змінна продуктивність машин на вивезенні, m^3 ;

P_i – змінна продуктивність основних машин на i -й операції, m^3 ;

P_{di} – змінна продуктивність додаткових машин на i -й операції, m^3 ;

V_s – середній об'єм хлиста, m^3 ,

L_t – середня відстань трелювання, м.

V_k – вид некерованого зовнішнього впливу, $k = 1, 2$,

....

Q_z – загальний запас на лісотехнічній операції, м³;

Z_{cp} – середній запас деревини на гектарі, м³;

L_{cp} – довжина зони безпеки, м.

З названих параметрів варіювати найпростіше параметрами лісозаготівельного процесу, пов'язаними з його організацією. Виберемо в якості факторів експерименту число змін роботи машин на кожній лісотехнічній операції (S_i).

Визначення області планування експерименту. Число лісозаготівельних операцій може становити від 2 до 4. Виберемо максимально можливе число операцій: 4. Тривалість зміни може становити від 8 до 12 год. Техніко-економічні умови конкретного підприємства впливають на організацію лісотехнічних робіт, їх оплату. Наприклад, число змін роботи – 1, 2, 3, можливість врахування і оплати понаднормових годин працівникам. За основу візьмемо варіант організації робіт в одну зміну з можливістю її незначного збільшення за рахунок понаднормових годин або скорочення з метою зниження зносу техніки.

Скорочення тривалості зміни може бути пов'язано зі зменшенням часу експлуатації машин, а не скороченням робочого дня фахівців.

Визначення виду цільової функції, складання матриці планування експерименту. Виберемо витрати енергії в якості функції відгуку (рис. 2).



Рис. 2. Структурна схема об'єкта дослідження.

Fig. 2. Block diagram of the object of study.

На змінні функції відгуку будуть накладатися обмеження, присутні в якості припущень в математичній моделі, яка описує лісотехнічний процес. Вони полягають у наступному: сумарна продуктивність основних і додаткових машин на «відстаючих» операціях повинна бути більше, ніж на «провідній».

Висновки

1. Виконано математичне моделювання виробничого процесу лісотехнічних робіт із врахуванням всього комплексу спільно вироблених технологічних операцій і можливості зміни складу машин.

2. Отримано математичні моделі, що визначають цільову функцію. Використано методи математичної теорії планування експерименту в поєднанні з детермінованим і статистичним виробничого процесу лісотехнічних робіт із врахуванням непевного характеру продуктивності машин для лісотехнічних робіт при різних зовнішніх умовах.

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. Astashev 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.

27. Тітова Л. Л. Розробка способів пошуку оптимальних параметрів виробничих процесів зі змінним складом машин для лісотехнічних робіт. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 2. P. 97-104.

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. Astatheev 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., Ohienko 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 mashines 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. 12(1). 147-154.
27. Titova L. L. (2021). Methods of searching for optimal parameters of production processes with variable composition of machines for forestry technology. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(2). 97-104.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МАШИН ДЛЯ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Л. Л. Тітова

Аннотация. В статье проведено исследование оптимизации параметров производственных процессов машин для лесотехнических работ. Методы планирования экспериментов и оптимизации пригодны для компьютерного моделирования производственных процессов машин для лесотехнических работ. Для большинства из них многократно проводить натурные эксперименты невозможно или нецелесообразно, но в точках плана можно реализовать вычислительный эксперимент. Предварительно должна быть сформирована математическая модель, позволяющая для заданных сообщений значений выбранных на этапе планирования эксперимента управляющих факторов, получать значение функции отклика. Затем можно использовать статистические методы для построения регрессионной модели, с помощью которой можно планировать и исследовать производственный процесс. В частности, становится возможным находить параметры процесса, соответствующие значениям функции отклика, близким к оптимальным.

Математические модели, описывающие основные параметры лесотехнического процесса, основанного на подключении дополнительного оборудования на «отстающих» операциях. Возникает задача оценки эффективности лесотехнических работный процесса.

Ключевые слова: математическая модель, оптимизация, параметр, машины для лесотехнических работ, производственный процесс, производительность.

MODELS OF FORMATION OF ENGINEERING
MANAGEMENT ALTERNATIVES IN METHODS
MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION
OF PARAMETERS OF PRODUCTION PROCESSES
OF MACHINES FOR FORESTRY WORKS

L. L. Titova

Abstract. In the article the research of optimization of parameters of production processes of machines for forestry works is carried out. Experimental planning and optimization methods are suitable for computer modeling of production processes of machines for forestry work. For most of them it is impossible or impractical to conduct field experiments repeatedly, but at the points of the plan it is possible to implement a computational experiment. A mathematical model must be formed in advance, which allows to obtain the values of the response function for the given combinations of values selected at the planning stage of the experiment of control factors. You can then use statistical methods to build a regression model that can be used to plan and study the production process. In particular, it becomes possible to find process parameters that correspond to the values of the response function close to optimal.

Mathematical models that describe the basic parameters of the forestry process, based on the connection of additional equipment on "lag" operations. There is a problem of estimating the efficiency of forestry work process.

Key words: mathematical model, optimization, parameter, machines for forestry work, production process, productivity.

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

