

**ОПТИМІЗАЦІЯ КІЛЬКІСНОГО СКЛАДУ ЗБИРАЛЬНО-  
ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ  
МАШИН ЗАСОБАМИ EXCEL**

**Флегантов Л.О., к.ф.-м.н., Овсієнко Ю.І., к.п.н.**

*(Полтавська державна аграрна академія)*

*У статті розглядається математична модель функціонування і алгоритм оптимізації кількісного складу збирально-транспортного комплексу сільськогосподарських машин (ЗТК), що включає певну кількість збиральних агрегатів (збиральних комбайнів) і транспортних агрегатів (транспортних засобів (ТЗ) та змінних причепів). Робота ЗТК, що моделюється на основі системного підходу, представлена, як випадковий процес «загибелі-народження». Розглянуто стаціонарний режим роботи ЗТК, критерієм оптимізації визначена мінімізація фінансових втрат від позапланового простою техніки, що виникає у робочому процесі внаслідок дії випадкових причин. Алгоритм оптимізації ЗТК оснований на використанні математичної моделі замкненої системи масового обслуговування  $M|M|t|l$ , параметри якої розраховуються виходячи з експлуатаційних показників технічних компонентів (складових) ЗТК, характеристик транспортної інфраструктури підприємства, урожайності культури та з урахуванням кількох різних варіантів організації збирально-транспортних робіт (робота без змінних причепів, робота виключно із змінними причепами, комбінований спосіб). Подається математичне обґрунтування моделі стаціонарного функціонування ЗТК та основні розрахункові формули. На основі побудованої моделі розглянуто модельну задачу, розв'язок якої включає визначення вхідних параметрів моделі ЗТК, розрахунок ймовірностей можливих станів системи та відшукування оптимальної кількості ТЗ у складі ЗТК. Відповідні розрахунки виконано для ЗТК у складі: комбайни КСС-2,6 і трактори Т-150, трактори МТЗ-80 і причепи 2-ПТС-4М. Запропонована модель та алгоритм оптимізації ЗТК реалізовані у статті засобами електронних таблиць Excel і можуть бути використані для створення комп'ютерного або мобільного додатку для застосування у практичній роботі інженерів аграрного виробництва.*

Математичні методи оптимізації і моделювання технологічних процесів і систем мають велике значення для ефективного вирішення повсякденних завдань, що виникають у практиці сучасних інженерів агропромислового виробництва. Аграрні підприємства, що систематично використовують методи математичного моделювання для аналізу й оптимізації власних виробничих процесів і систем, підвищують свою ефективність і здобувають ринкові переваги, зокрема, за рахунок зниження собівартості виробленої продукції, реалізації можливостей оптимального управління і планування, прогнозування результатів господарчої діяльності, тощо [12].

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Сьогодні очевидним є обмежений характер застосування математичних методів у практичній діяльності інженерів аграрного виробництва. Це, на нашу думку, зумовлене, насамперед, великим різноманіттям та відносною складністю таких методів, а також відсутністю зручних спеціалізованих програмних засобів їх практичної реалізації. Виробничі системи і процеси, що застосовуються в аграрному виробництві мають випадковий характер, і тому, у загальному випадку, описуються найбільш складними для побудови і практичної реалізації динамічними стохастичними математичними моделями, серед яких можна виділити, зокрема, особливий клас математичних моделей, відомих, як моделі масового обслуговування (або моделі черг). Ці моделі, ґрунтуючись на теоретичних засадах теорії ймовірностей, у той же час широко використовують різноманітні методи лінійної алгебри, математичного аналізу, теорії диференціальних рівнянь тощо. Такі моделі мають доволі універсальний характер і тому до цього часу набули поширення у різних сферах, дозволяючи ефективно вирішувати практичні питання раціональної організації стохастичних систем. Зокрема, вони застосовуються для оптимізації мереж зв'язку, транспортних мереж, розбудови інфраструктури населених пунктів, організації роботи підприємств громадського харчування, торгівельного, медичного обслуговування, а також вирішення багатьох задач, пов'язаних із енергозабезпеченням, машино-використанням, надійністю і ремонтом в агропромисловому виробництві [11]. З розвитком комп'ютерних технологій ці моделі поступово впроваджуються у повсякденну практику аграрного виробництва, де на тлі багатьох важливих практичних проблем, одним з найбільш актуальних є завдання оптимізації сільськогосподарських виробничих комплексів, типовим прикладом яких є збирально-транспортний комплекс сільськогосподарських машин (ЗТК).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які посилається автор.** Теоретичним основам вивчення і моделювання систем масового обслуговування присвячено багато наукових праць, серед яких можна виділити фундаментальні роботи [5] і [3], що знаменують, відповідно, перші узагальнення та сучасний стан цієї теорії. Масштабні дослідження практичних задач у цьому напрямку стримувалися тим, що реалізація, прорахунок варіантів і аналіз результатів, одержаних за допомогою методів теорії масового обслуговування, вимагають, зазвичай, значного обсягу обчислень. У період заснування і наступного етапу розвитку теорії масового обслуговування засоби комп'ютерної техніки ще не набули такого значного поширення, як сьогодні. Тому, на початку ця теорія знайшла численні практичні застосування, в основному, у більш наукоємних і рентабельних галузях: у сфері зв'язку, транспортного сполучення, частково, у промисловості, виробництві тощо. Застосуванням теорії масового обслуговування в аграрній сфері були присвячені лише окремі публікації [6-9]. Також до перших спроб у напрямку застосування теорії масового обслуговування у галузі сільського господарства належать окремі результати, представлені в [12].

З розвитком аграрного виробництва в Україні, яке сьогодні визнається, як пріоритетна галузь економіки, ці методи знов стають актуальними. Посібник [11] був спробою систематизувати і узагальнити деякі з напрацьованих в цьому напрямку практичних результатів, розглядаючи їх крізь призму математичної теорії, та запропонувати зручні алгоритми оптимізації деяких найбільш важливих у практичному розумінні (з точки зору автора) сільськогосподарських виробничих комплексів і процесів на основі методів теорії масового обслуговування.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** На цей час, незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених задачам оптимізації систем масового обслуговування, проблема описання спеціалізованих математичних моделей, що використовують загальні підходи теорії масового обслуговування, а також комп'ютерних алгоритмів їх реалізації, націлених на практичне застосування в галузі аграрного виробництва, залишається, у більшості, поза увагою дослідників і практиків-фахівців у галузі аграрної інженерії. Тому на сьогодні важливим і актуальним завданням є представлення і описання таких математичних моделей і алгоритмів, що були б придатними для повсякденного практичного використання, і на основі яких було б можливим, зокрема, створення спеціалізованих програмних засобів для фахівців-практиків аграрної сфери.

**Формулювання мети статті (постановка завдання).** Метою даної статті є представлення математичного методу моделювання і оптимізації технологічних процесів і систем на прикладі визначення оптимального кількісного складу збирально-транспортного комплексу сільськогосподарських машин із використанням комп'ютерної реалізації математичної моделі замкненої системи масового обслуговування (з чергою, без резерву) у середовищі електронних таблиць Excel.

Розглянемо змістову постановку задачі [11]. Планується виконання збиральних робіт збирально-транспортним комплексом (ЗТК) у складі якого є  $m$  однотипних збиральних комбайнів,  $R$  змінних причепів і  $n$  транспортних засобів (ТЗ) однакової з причепами вантажності, що перевозять зібрану масу на деяку відстань від поля до місця зважування і розвантаження продукції. Внаслідок випадковості, притаманній будь-якому робочому процесу, під час виконання збирально-транспортних робіт можуть виникати непередбачені затримки, що призводять до незапланованого простою комбайнів або транспортних засобів: при недостатній кількості транспортних засобів простоюватимуть комбайни, а при їх надлишковій кількості, простоюватимуть самі транспортні засоби. Необхідно визначити оптимальну кількість  $n_{opt}$  транспортних засобів у складі ЗТК, при якій загальні втрати від випадкових простоїв техніки будуть мінімальними.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Як зазначається у роботі [10]: «Сенс системного підходу при дослідженні процесів в техніці полягає в розгляді будь-якого технічного об'єкту, як системи взаємопов'язаних елементів, що

утворюють єдине ціле». Виходячи з цього, можна уявити роботу ЗТК, як функціонування технічної системи, всередині якої реалізується випадковий процес обслуговування, під час якого транспортні агрегати (ТА) у випадкові моменти часу вимагають і отримують обслуговування з боку збиральних агрегатів (ЗА).

Дійсно, у процесі роботи ЗТК збиральні агрегати (ЗА) розвантажують зібране у транспортні засоби (ТЗ), що перевозять зібране до місця зважування, розвантаження і зберігання. Ретельне планування й чітка організація роботи ЗТК не здатні врахувати вплив усіх можливих випадкових факторів. Внаслідок цього відбуватимуться неконтрольовані затримки, як під час збирання, так і під час транспортування продукції. В результаті, збиральна техніка неодмінно буде простоювати деякий час, очікуючи на розвантаження, коли всі транспортні засоби будуть зайняті, а транспортна техніка, у свою чергу, також буде простоювати зайве, очікуючи на завантаження, коли збиральний агрегат внаслідок випадкових причин, не готовий виконати їх вимогу про завантаження. Отже, при недостатній кількості ТА у складі ЗТК, виникатимуть простоя ЗА, а при зайвій кількості ТА будуть простоювати, очікуючи завантаження, самі ТА. Тому, загальні втрати від простою техніки складаються з втрат від простою ТА і ЗА.

Зрозуміло, що такі непередбачувані затримки спричиняють зайві грошові витрати, що певним чином збільшує собівартість виробленої продукції, зменшує конкурентоспроможність підприємства. Крім того, прогнозування втрат, що виникають за рахунок незапланованого простою техніки, без застосування математичних моделей є практично неможливим.

Критерій оптимізації роботи ЗТК, відповідний поставленому завданню, виразимо цільовою функцією, що визначає загальні втрати від простою техніки в розрахунку на один комбайн, грн./год.:

$$\Phi(n) = \frac{1}{m}(C_n n_0 + C_m m_0), \quad (1)$$

де:  $C_n$  – середня вартість втрат від простою одного ТА, грн./год.;  $C_m$  – середня вартість втрат від простою одного ЗА, грн./год.;  $n_0$  – середня кількість ТА, що простоюють;  $m_0$  – середня кількість ЗА, що простоюють.

Побудова математичної моделі. Для описання випадкового процесу роботи ЗТК будемо математичну модель на зразок математичної моделі замкненої системи масового обслуговування (СМО) [3, 5], призначеної для обслуговування  $n$  об'єктів, що у випадкові моменти часу звертаються за обслуговуванням, яка має  $m$  каналів (пристроїв) обслуговування ( $m \leq n$ ). Можна показати, що кожен з  $n$  об'єктів обслуговування (ТА) є джерелом найпростішої течії вимог [3, 5] з інтенсивністю  $\lambda$  одиниць за годину, а час обслуговування на кожному пристрої обслуговування (ПО), у якості яких виступають ЗА, має показниковий розподіл з інтенсивністю  $\mu$  одиниць за годину, тобто є неперервною випадковою

величиною із функцією розподілу  $F(t)=1-e^{-\mu t}, t>0$  [4]. У позначеннях Кендалла [11], така система кодується символами  $M|M|m|l$ , де  $M$  – позначає марківську (найпростішу) течію обслуговування [5];  $m$  – кількість каналів обслуговування (ОП) у системі;  $l = n - m$  – максимально можлива довжина черги на обслуговування.

Процес функціонування ЗТК представимо графічною схемою (графом), що описує послідовні переходи системи з одного стану до іншого у випадкові моменти часу (рис. 1).

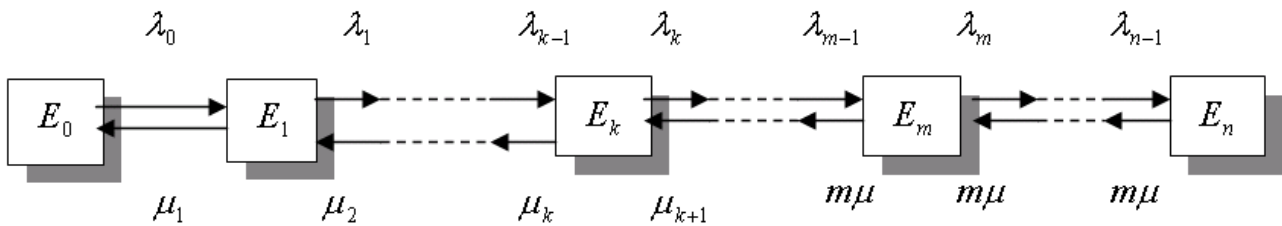


Рис. 1 – Графічна схема процесу функціонування ЗТК [11]

На схемі (рис. 1)  $E_k$  означає стан системи, коли в ній перебуває (обслуговується або очікує на обслуговування)  $k$  вимог,  $0 \leq k \leq n$ . Перехід  $E_k \mapsto E_{k+1}$  означає, що до системи, де знаходиться  $k$  вимог, надійшла ще одна вимога від одного з  $n - k$  джерел, що знаходяться поза системою; інтенсивність цього переходу, під якою розуміємо середню кількість таких переходів за одиницю часу,  $\lambda_k = (n - k)\lambda$ ,  $k = \overline{0, n}$ . У свою чергу, перехід  $E_k \mapsto E_{k-1}$  означає, що одна з  $k$  вимог, що перебували у системі, була обслугована і покинула систему. Оскільки, система має  $m$  каналів, то одночасно в ній можуть обслуговуватися не більше, ніж  $m$  вимог. Тому, інтенсивність переходу

$$E_k \mapsto E_{k-1} \text{ буде } \mu_k = \begin{cases} k\mu, & k = \overline{1, m-1}; \\ m\mu, & k = \overline{m, n} \end{cases}.$$

У нашому випадку  $E_k$  означає такий стан системи (ЗТК), коли  $k$  з  $n$  наявних ТА є вільними і готовими для завантаження (обслуговування). Очевидно, що при  $k > m$  ( $k - m > 0$ ), тобто, коли система перебуває у стані  $E_{k > m}$ , виникатимуть прості ТА. При цьому, кількість ТА, що простоюють, буде рівною  $k - m$ . Аналогічно, коли система перебуває у стані  $E_{k < m}$ , тобто при  $m > k$  ( $m - k > 0$ ), простоюватимуть  $m - k$  ЗА.

Кількість вимог у системі  $k$  є дискретною випадковою величиною. Отже,  $k - m$  і  $m - k$  також є дискретними випадковими величинами. Якщо  $p_k = P(E_k) = P(k)$  – ймовірність перебування системи у стані  $E_k$ , то  $n_0$  і  $m_0$  у формулі (1) можна визначити, як математичні сподівання відповідних випадкових величин [4, 5]:

$$n_0 = M(k - m) = \sum_{k=m}^n (k - m) p_k; \quad m_0 = M(m - k) = \sum_{k=0}^m (m - k) p_k \quad (2)$$

**Розрахунок  $p_k$ .** У загальному випадку ймовірності  $p_k$  є функціями часу  $p_k = p_k(t)$ , для яких можна записати [5]:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -\lambda n p_0 + \mu p_1, & k = 0; \\ \frac{dp_k}{dt} = \lambda(n-k+1)p_{k-1} - (\lambda(n-k) + k\mu)p_k + k\mu p_{k+1}, & k = \overline{1, m-1}; \\ \frac{dp_k}{dt} = \lambda(n-k+1)p_{k-1} - (\lambda(n-k) + m\mu)p_k + m\mu p_{k+1}, & k = \overline{m, n-1}; \\ \frac{dp_n}{dt} = \lambda p_{n-1} - m\mu p_n, & k = n. \end{cases} \quad (3)$$

Однак, у стаціонарному режимі функціонування ЗТК, ймовірності  $p_k$  є не залежать від часу, і тому описуються однорідною системою лінійних алгебраїчних рівнянь [11]:

$$\begin{cases} \lambda n p_0 - \mu p_1 = 0, & k = 0; \\ \lambda(n-k+1)p_{k-1} - (\lambda(n-k) + k\mu)p_k + k\mu p_{k+1} = 0, & k = \overline{1, m-1}; \\ \lambda(n-k+1)p_{k-1} - (\lambda(n-k) + m\mu)p_k + m\mu p_{k+1} = 0, & k = \overline{m, n-1}; \\ \lambda p_{n-1} - m\mu p_n = 0, & k = n. \end{cases} \quad (4)$$

З (3), з урахуванням умови нормування  $\sum_{k=0}^n p_k = 1$  знайдемо:

$$p_0 = \left( \sum_{k=0}^{m-1} \frac{n!}{(n-k)! k!} \rho^k + \sum_{k=m}^n \frac{n!}{(n-k)! m! m^{k-m}} \right)^{-1}$$

$$p_k = \frac{n!}{(n-k)!} \rho^k p_0 \begin{cases} \frac{1}{k!}, & k = \overline{1, m-1}; \\ \frac{m^{m-k}}{m!}, & k = \overline{m, n} \end{cases}, \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (5)$$

**Визначення параметрів  $\lambda$  і  $\mu$ .** Параметр  $\lambda$  у (4) означає інтенсивність течії заявок на обслуговування ТА з боку ЗА. Він визначається емпірично, як  $\lambda = \frac{1}{t_\lambda}$ , де  $t_\lambda$ , год. – середній час, за який ТА виконує один повний цикл операцій:

(а) рух із вантажем від поля до місця зважування і розвантаження; (б) зважування; (в) розвантаження; (г) зворотний рух без вантажу до місця завантаження (або до місця заміни порожнього причепу на завантажений

причеп) [8, 9]. Отже,  $t_{\lambda} = t_v + t_z + t_r + t_p$ , де  $t_v = \frac{S_g}{v_{vg}} + \frac{S_d}{v_{vd}}$  – середній час руху з вантажем від поля, год.;  $t_z$  – середній час зважування, год.;  $t_r$  – середній час розвантаження, год.;  $t_p = \frac{S_g}{v_{pg}} + \frac{S_d}{v_{pd}}$  – середній час руху без вантажу (порожнім), год., де  $s_g$  – шлях, що проходить ТА по полю (грунтом), км;  $s_d$  – шлях, що проходить ТА по дорозі, км;  $v_{vg}$ ,  $v_{pg}$ ,  $v_{vd}$ ,  $v_{pd}$  – швидкість руху ТА з вантажем і порожнім, по грунту і по дорозі відповідно, км.

Аналогічно,  $\mu = \frac{1}{t_{\mu}}$  означає інтенсивність течії обслуговування ТА з боку

ЗА: де  $t_{\mu}$ , год. – середній час, необхідний для обслуговування (завантаження) ТА, що прибуває на поле за черговим вантажем. Розрахунок параметру  $\mu$  змінюється, залежно від того, який зі способів обслуговування ТА (в залежності від кількості змінних причепів  $R$ ) реалізується на практиці.

Якщо транспортування відбувається без використання змінних причепів ( $R = 0$ ), тобто все зібране завантажується безпосередньо у ТА, то  $t_{\mu} = t_1 = \frac{Q}{W_k U}$ , де  $Q$  – вантажопідйомність транспортного засобу, т;  $W_k$  – нормативна продуктивність ЗА, га/год.,  $U$  – урожайність культури, т/га.

Якщо робота відбувається виключно з причепами ( $R = m$ ), тобто зібране завантажується тільки у змінні причепа, то  $t_{\mu} = t_2 = t_1 + t_{zp}$ , де  $t_{zp}$  – середній час заміни причепа.

Найбільш загальним випадком є комбінований спосіб ( $0 < R < m$ ), коли частина ТА обслуговується по першому і другому способам, а інші очікують обслуговування (завантаження) у черзі. В цьому випадку  $t_{\mu} = t_3 = \frac{m}{\frac{m-R}{t_1} + \frac{R}{t_2}}$ .

З урахуванням цього:

$$n_0 = \begin{cases} n_{0\div} + \tilde{m}, & R = 0; \\ n_{0\div}, & R = m; \\ n_{0\div} + n_{0\zeta}, & 0 < R < m, \end{cases} \quad (6)$$

де:  $\tilde{m} = m - m_0$  – середня кількість ЗА, що працюють;  $n_{0\div} = \sum_{k=1}^{n-m} k p_{k+m}$  – середня кількість ТЗ, що простоюють у черзі;  $n_{0\zeta} = \sum_{k=1}^{m-R} k p_{k+R}$  – середня кількість ТЗ, що завантажуються.

Таким чином, формули (1) – (6) дозволяють виконати розрахунок значень  $n_0$  і  $m_0$  для різної кількості транспортних засобів  $n$ . Множина допустимих значень  $n$ , визначається нерівністю [11]:

$$\frac{m}{\rho} \leq n \leq \frac{m}{\rho}(1 + \rho) \quad (7)$$

Таким чином, для відшукування  $n_{i\gamma\delta}$  необхідно обчислити значення цільової функції (1) при всіх допустимих значеннях  $n$ , і з одержаних значень визначити найменше, що відповідає  $n = n_{i\gamma\delta}$ .

**Комп’ютерна реалізація моделі.** Реалізація даного підходу вимагає значного обсягу однотипних обчислень. Тому математична модель (1) – (7) може бути реалізована засобами електронних таблиць. В нашому випадку, для виконання розрахунків ми обрали електронні таблиці Excel.

На малюнку (рис. 2) представлений блок введення вхідних параметрів моделі на робочому аркуші Excel. Експлуатаційні характеристики подані для ЗА у складі – силосозбиральний комбайн КСС-2,6 і трактор Т-150, та для ТА – трактор МТЗ-80 з причепом 2-ПТС-4М. Інші параметри моделі мають ілюстративний характер.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Флегантов Л.О., Овсієнко Ю.І.								
2	<b>Оптимізація кількісного складу збирально-транспортного комплексу (ЗТК)</b>								
3									
4	m=	5 од.	Vвг=	8 км/год.	Cп=	800 грн/год			
5	R_=	2 од.	Vпг=	11 км/год.	Cт=	210 грн/год			
6	Sд=	4 км	Vвд=	15 км/год.					
7	Sг=	0,5 км	Vпд=	18 км/год.					
8									
9	U=	20 т/га	tз=	0,03 год.					
10	Q=	4 т	тп=	0,10 год.	tв=	0,329167 год.			
11	Wк=	0,98 га/год.	tзп=	0,15 год.	тп=	0,267677 год.			

Рис. 2 – Блок введення вхідних параметрів моделі.

Наступний малюнок (рис. 3) показує результати розрахунків допоміжних параметрів ЗТК для вихідних параметрів моделі, представлених вище (рис. 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
13	T_лямбда=	0,726843 год.	мю=	4,069683 од./год.	n_min=	15 од.			
14	лямбда=	1,375812 од./год.	ро=	0,338064	n_max=	20 од.			
15									
16	<b>1) без причепів</b>		<b>2) виключно з причепами</b>			<b>3) комбінований спосіб</b>			
17	T_мю1=	0,204082 год.	T_мю2=	0,354082 год.	T_мю3=	0,245719 год.			
18	мю1=	4,9 од./год.	мю2=	2,824207 од./год.	мю3=	4,069683 од./год.			

Рис. 3 – Результати розрахунків допоміжних параметрів ЗТК.



Таблиця 1, що представлена на малюнку (рис. 3), містить результати розрахунку ймовірностей можливих станів ЗТК, виконаних згідно формул (5), для всіх допустимих значень  $n$ , що визначаються за допомогою (7).

	A	B	C	D	E
20	<b>Таблиця 1 - Значення ймовірностей <math>P_k</math> стану ЗТК</b>				
21	k	n			
22		15	16	17	18
23	0	0,0095	0,0065	0,0044	0,0029
24	1	0,0483	0,0353	0,0254	0,0179
25	2	0,1226	0,0955	0,0729	0,0544
26	3	0,2072	0,1721	0,1397	0,1103
27	4	0,1961	0,1746	0,1512	0,1268
28	5	0,1724	0,1652	0,1533	0,1372
29	6	0,1399	0,1452	0,1451	0,1391
30	7	0,1040	0,1178	0,1275	0,1317
31	8		0,0876	0,1035	0,1158
32	9			0,0770	0,0939
33	10				0,0699
34	Сума	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Рис. 4 – Результати розрахунку ймовірностей станів системи (ЗТК).

Результати підсумкових розрахунків, виконаних за формулами (1), (2), (6) представлені у таблиці 2 (рис. 5).

	A	B	C	D	E
36	<b>Таблиця 2 - Числові характеристики системи</b>				
37	$\Phi(n)$	163,9150	158,5874	160,7171	169,5711
38	n	15	16	17	18
39	$n_0$	1,5837	2,0226	2,5222	3,0873
40	$m_0$	0,6087	0,4602	0,3424	0,2494
41	$m_{\sim}$	4,3913	4,5398	4,6576	4,7506
42	роз	0,2072	0,1721	0,1397	0,1103
43	поч	1,3765	1,8505	2,3824	2,9770

Рис. 5 – Результати розрахунку числових характеристик системи.

За даними таблиці 2 можна зробити висновок, що мінімальні загальні втрати за рахунок простою техніки в розрахунку на один комбайн – мінімальне значення цільової функції (1) буде рівним  $\Phi_{\min} = \Phi(16) = 158,59$  грн. Отже, якщо склад ЗТК налічує  $m = 5$  комбайнів і  $R = 2$  змінних причепів, а шлях від поля до місця зважування і розвантаження складає  $s_d = 4$  км, то, при значеннях інших параметрів системи, заданих вище, оптимальна кількість ТЗ в складі ЗТК становить  $n_{i\dot{o}} = 16$  од.

Цей висновок ілюструє стовпчикова діаграма (рис. 6), що відображає значення цільової функції  $\Phi(n)$  залежно від кількості транспортних засобів  $n$  (рис. 11):

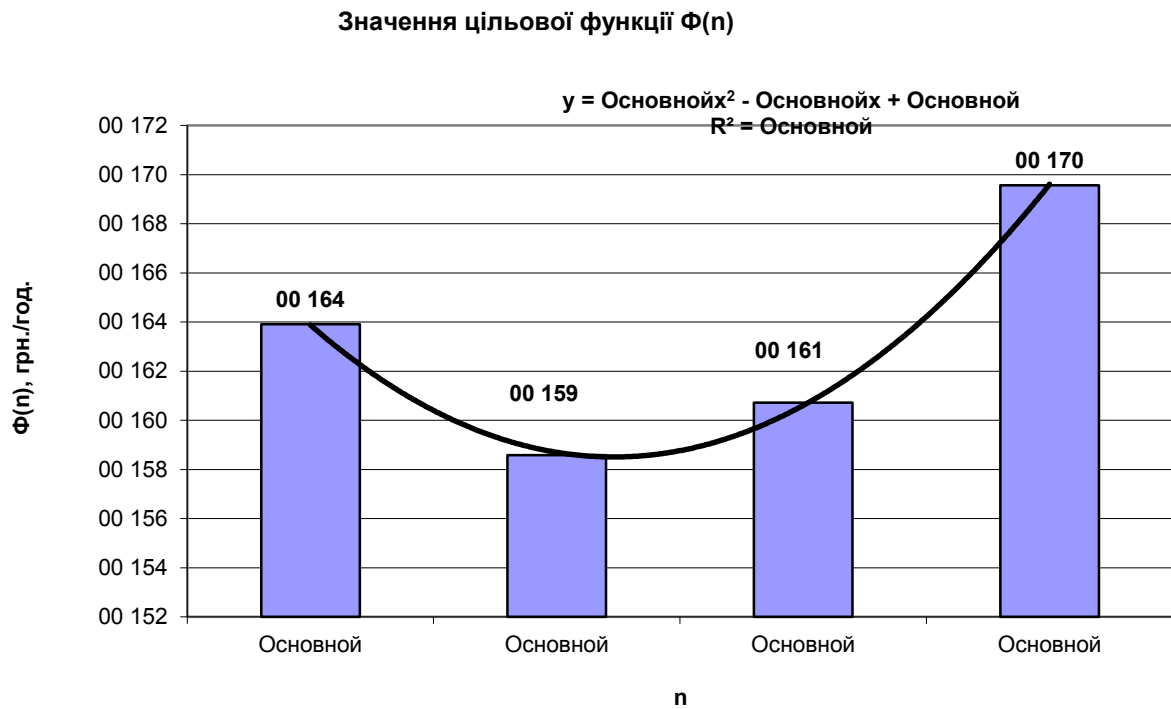


Рис. 6 – Залежність значень цільової функції  $\Phi(n)$  від кількості транспортних засобів у складі ЗТК.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку.** Таким чином, математична модель, представлена у даній статті, дозволяє сформулювати алгоритм оптимізації кількісного складу ЗТК, що можна представити, як послідовність наступних кроків:

1. Зафіксувати кількісні параметри ЗТК, експлуатаційні характеристики складових ЗТК, параметри транспортної інфраструктури підприємства, урожайність культури тощо (рис. 2).
2. Сформулювати критерій оптимізації у вигляді цільової функції (1).
3. Згідно (7) знайти область визначення функції (1) – множину допустимих значень параметру оптимізації.
4. Емпіричним шляхом (за даними спостережень) визначити параметри інтенсивності вхідної течії і течії обслуговування, що характеризують робочий процес ЗТК.
5. За формулами (5), обчислити ймовірності можливих станів ЗТК і виконати розрахунки за формулами (2) і (6).
6. Обчислити значення цільової функції (1) для всіх допустимих значень параметру оптимізації  $n$ .

Запропонований алгоритм оптимізації кількісного складу збирально-транспортного комплексу є простим для реалізації в електронних таблицях і може бути без обмежень застосований у практичній роботі спеціаліста з енергозабезпечення збирально-транспортних робіт в аграрних підприємствах. Змінюючи вхідні параметри моделі відповідно до характеристик наявних засобів

енергозабезпечення та транспортної інфраструктури господарства, можна виконувати оперативні розрахунки оптимального складу ЗТК.

Використовуючи дану модель можна виконувати розрахунки для типових конфігурацій ЗА і ТА для різних культур та різних параметрів транспортної інфраструктури аграрних підприємств. Запропонована модель та алгоритм оптимізації ЗТК, що реалізовані у даній статті засобами електронних таблиць Excel, можуть бути використані безпосередньо для створення комп'ютерного або мобільного додатку для допомоги у практичній роботі інженерів аграрного виробництва.

### Список використаних джерел

1. Arifin, Moh Zainal. Applications of Queuing Theory in the Tobacco Supply / Moh Zainal Arifin, Banun Diyah Probowati, Sri Hastuti // Agriculture and Agricultural Science Procedia, Volume 3, 2015, Pages 255-261.
2. Pardo, María José. Optimizing a priority-discipline queueing model using fuzzy set theory / María José Pardo, David de la Fuente // Computers & Mathematics with Applications, Volume 54, Issue 2, July 2007, Pages 267-281.
3. Ross, Sheldon M. Queueing Theory // Introduction to Probability Models (Twelfth edition), 2019, Pages 507-589.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
5. Гнеденко В.В. Введение в теорию массового обслуживания / В.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
6. Гунер Л.И. Алгоритм оптимизации состава системы технического обслуживания машин комплекса / Л.И. Гунер // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1983. – № 9. – с. 16-19.
7. Гунер Л.И. Единство посевных и уборочных комплексов / Л.И. Гунер // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1981. – № 6. – с. 35-38.
8. Гунер Л.И. Системный анализ работ уборочно-транспортного комплекса / Л.И. Гунер // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1979. – №9. – с. 4-7.
9. Добролюбов В.К. Оптимизация состава уборочно-транспортных групп по заготовке силоса / В.К. Добролюбов // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1984. – № 11. – с. 6-9.
10. Запорожець М.І. Система «машина-поле» : навчальний посібник / М.І. Запорожець, І.А. Дудніков, Р.М. Харак. – Полтава: ТОВ «Рік», 2015. – 248 с.
11. Флегантов Л.О. Математичні моделі масового обслуговування у практиці інженерів сільського господарства : навчальний посібник / Л.О. Флегантов. – Полтава: «ІнтерГрафіка», 2006. – 124 с.
12. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж.Х.М. Торнли. – Агропромиздат, 1987. – 400 с.

## Аннотация

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ EXCEL

Флегантов Л.А., Овсиенко Ю.И.

*В статье рассматриваются математическая модель работы и алгоритм оптимизации количественного состава уборочно-транспортного комплекса сельскохозяйственных машин (УТК), включающего определенное количество единиц уборочной техники (например, зерноуборочных комбайнов) и транспортных единиц (транспортные средства (ТС) и сменные прицепы). Работа УТК, которую мы моделируем на основе системного подхода, представлена, как случайный процесс типа «смерть-рождение». Рассматривается стационарный режим работы УТК, критерием оптимизации системы является минимизация финансовых потерь от незапланированных простоев оборудования, возникающих в процессе работы по случайным причинам. Алгоритм оптимизации УТК основан на использовании математической модели замкнутой системы массового обслуживания  $M|M|t|l$ , параметры которой рассчитываются исходя из показателей эффективности технических компонентов УТК, характеристик транспортной инфраструктуры предприятия и урожайности с учетом некоторых возможных вариантов организации уборочно-транспортных работ (работа без сменных прицепов, работа исключительно со сменными прицепами, комбинированный метод). Представлено математическое обоснование модели стационарного функционирования УТК и основные расчетные формулы. На основе построенной модели рассмотрена практическая задача, решение которой включает в себя определение входных параметров стохастической модели УТК, вычисление вероятностей возможных состояний системы и определение оптимального количества ТС в УТК. Расчеты проведены для УТК в составе: комбайны КСС-2.6 агрегатируются с тракторами Т-150, тракторы МТЗ-80 - с прицепами 2-ПТС-4М. Предложенная модель и алгоритм оптимизации УТК реализованы с использованием электронных таблиц Excel, и могут быть использованы для создания компьютерного или мобильного приложения для применения в практической работе инженеров аграрного производства.*

## Abstract

### OPTIMIZATION THE HARVEST-TRANSPORT COMPLEX QUANTITATIVE COMPOSITION OF AGRICULTURAL MACHINES BY MEANS OF EXCEL

Leonid Flehantov, Yuliia Ovsienko

*The article discusses the mathematical model of operation and the algorithm for optimizing the quantitative composition of the harvest-transport complex of agricultural machines (HTC) includes a certain number of harvesting units (for example combine harvesters) and transport units (vehicles (VHC) and exchangeable trailers). The work of the HTC, we model on the basis of a systematic approach, is presented as a random “death-birth” type process. The stationary operation mode of the HTC is considered, the optimization criterion of the system is the minimization of financial losses from unplanned downtime of equipment that occurs in the work process due to random reasons. The algorithm for optimizing is based on the use of a mathematical model of a closed queuing system  $M | M | m | l$ , the parameters of which are calculated based on the performance indicators of technical components of HTC, characteristics of the transport infrastructure of an enterprise and crop yield, taking into account some possible options for organizing harvest-transport works (work without exchangeable trailers, work exclusively with exchangeable trailers, combined method). The mathematical substantiation of the model of the stationary functioning of the HTC and the main calculation formulas are presented. On the basis of the constructed model, a problem is considered, the solution of which includes determining the input parameters of the stochastic HTC model, calculating the probabilities of possible states of the system, and finding the optimal number of vehicles in the HTC. The calculation was made for the HTC consisting of: KSS-2.6 combines are aggregated with tractors T-150, tractors MTZ-80 - with trailers 2-PTS-4M. The proposed model and algorithm for optimizing the HTC are implemented in this article using Excel spreadsheets and can be used to create an application / mobile application to assist in the practical work of agricultural production engineers.*