

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

КАФЕДРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ МАШИН

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

**Методичні вказівки до виконання практичних
занять з курсу**

для студентів спеціальності 208"Агроінженерія",
спеціалізації "Технічний сервіс"
освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

Кропивницький, ЦНТУ 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

КАФЕДРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ МАШИН

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

**Методичні вказівки до виконання практичних
занять з курсу**

для студентів спеціальності 208"Агроінженерія",
спеціалізації "Технічний сервіс"
освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

Затверджено на засіданні кафедри
"Експлуатація та ремонт машин"
протокол № 13 від 30 травня 2018 р.

Кропивницький, ЦНТУ 2018

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу "Теоретичні основи експлуатації сільськогосподарської техніки".

Для студентів спеціальності 208 "Агроінженерія", спеціалізації "Технічний сервіс" освітньо-кваліфікаційного рівня магістр. Кропивницький: ЦНТУ, 2018.- 105 с.

Укладачі: Матвієнко О.О.
Крилов О.В.

Комп'ютерний набір і верстка О.В. Крилов

Зміст

<i>Практичне заняття №1</i>	
Експлуатаційні властивості двигунів тракторів і самохідних машин.	6
Обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи	
<i>Практичне заняття №2</i>	
Експлуатаційні показники тракторів. Обґрунтування енергозберігаючих і ґрунтозахисних режимів роботи	12
<i>Практичне заняття №3</i>	
Експлуатаційні показники мобільних сільськогосподарських машин.	18
Обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи	
<i>Практичне заняття №4</i>	
Комплектування ресурсозберігаючих машинно-тракторних агрегатів	25
<i>Практичне заняття №5</i>	
Обґрунтування ресурсозберігаючих способів руху машинно-тракторних агрегатів	34
<i>Практичне заняття №6</i>	44
Визначення продуктивності машинно-тракторного агрегату	
<i>Практичне заняття №7</i>	
Визначення експлуатаційних витрат при роботі машинно-тракторних агрегатів	50
<i>Практичне заняття №8</i>	
Оптимізація експлуатаційних параметрів і режимів роботи машинно-тракторних агрегатів за критеріями ресурсозбереження	55
<i>Практичне заняття №9</i>	
Аналіз експлуатаційної надійності агрегатів, ланок і технологічних комплексів	61
<i>Практичне заняття №10</i>	
Забезпечення експлуатаційної надійності технологічних комплексів методами резервування	72
<i>Практичне заняття №11</i>	
Вибір стратегій ремонтно-технічних дій для забезпечення надійної роботи технологічних комплексів	79
<i>Практичне заняття №12</i>	
Оптимізація характеристик системи технічного обслуговування і відновлення технологічних комплексів	87
<i>Практичне заняття №13</i>	
Визначення потреби в обмінному фонді запасних частин	94

Практичне заняття №1

Експлуатаційні властивості двигунів тракторів і самохідних машин.

Обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи

Мета роботи – набути навички самостійного вибору режиму високоефективного використання двигунів в залежності від умов роботи.

Загальні відомості

При нормальному завантаженні двигуна виникає більш повне згорання палива і відповідно зменшується кількість шкідливих викидів в атмосферу, що особливо важливо з екологічної точки зору.

Експлуатаційні властивості двигунів внутрішнього згорання, що вивчаються, визначаються ефективною потужністю, крутним моментом, кутовою швидкістю або частотою обертання, а також годинною і питомою витратами палива. Ці величини пов'язані між собою співвідношеннями:

$$N = M_{кр} \cdot \omega = M_{кр} \frac{\pi n}{30} = 0,105 M_{кр} \cdot n$$

$$g_e = \frac{10^3 \cdot G_T}{N}$$

де N – ефективна потужність двигуна, кВт; $M_{кр}$ – крутний момент на валу двигуна, кН·м; ω – кутова швидкість, рад/с; n – частота обертання валу двигуна, об/хв.; G_T – годинна витрата палива, кг/год; g_e – питома витрата палива, г/(кВт·год).

Взаємопов'язані значення N , $M_{кр}$, n , G_T , g_e відобразити графічно на регуляторній характеристиці, яку для експлуатаційних розрахунків частіше всього будують в функції від n або M .

В межах даного завдання з регуляторної характеристики достатньо використовувати тільки графік залежності крутного моменту M від частоти обертання n (рис. 1.1).

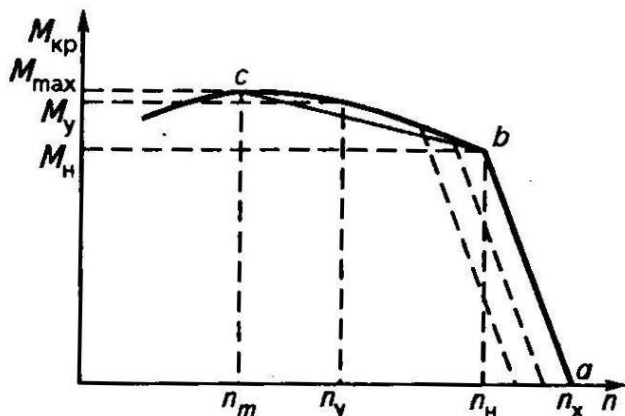


Рисунок 1.1 – Регуляторна характеристика дизеля із все режимним регулятором
 ab – регуляторна гілка; bc – перевантажувальна (корегувальна) гілка; - - - - часткові характеристики

На рисунку 1.1 регуляторній гілці відповідає відрізок ab , а перевантажувальній (корегувальній) гілці – відрізок bc , яким наближено замінена фактична крива перевантажувальної гілки.

Основним режимам роботи двигуна на графіку відповідають точки: a – режим холостого ходу при повній подачі палива, крутному моменті $M_{кр} = 0$, потужності $N = 0$ і частоті обертання n_x ; b – режим номінального (паспортного) завантаження при крутному моменті M_n , номінальній потужності N_n і частоті обертання n_n ; c – режим максимального перевантаження при найбільшому крутному моменту M_{max} , що відповідає потужності N_m і частоті обертання n_m . Значення n_x , n_n , n_m , M_n , M_{max} , N_n слід вибирати з таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Основні параметри двигунів тракторів

Трактор (колісна формула)	Двигун	n_x об/хв	n_H об/хв	n_m об/хв	M_H , кН·м	M_{max} , кН·м	N_H , кВт
T-25A(4K2)	Д-21А	1920	1800	1200	0,0971	0,110	18,38
T-30(4K2)	Д-120	2133	2000	1333	0,105	0,119	22,1
T-30A-80(4K4)							
T-40M(4K2)	Д-144	1950	1795	1200	0,196	0,226	36,76
T-40AM(4K4)							
ЮМЗ-6АКЛ(4K2)	Д-65	1870	1750	1250	0,253	0,290	46,32
МТЗ-80(4K2)	Д-240	2350	2200	1400	0,239	0,280	55,22
МТЗ-82(4K4)							
МТЗ-100(4K2)	Д-245	2380	2200	1400	0,319	0,375	73,6
МТЗ-102(4K4)							
T-142(4K4)	Д-260Т	2272	2100	1337	0,517	0,607	114
ЛТЗ-55А(4K4)	Д-144-32	1950	1800	1204	0,183	0,205	39
ЛТЗ-60АВ(4K4)	Д-65М1Л	1870	1750	1250	0,253	0,290	46,32
ЛТЗ-155(4K4)	СМД-25	2001	1850	1237	0,566	0,665	110
T-150K(4K4)	ЯМЗ-240	2020	1900	1296	0,442	0,507	88,3
T-150K(4K4)	СМД-62	2280	2100	1400	0,552	0,635	121,47
К-700А(4K4)	ЯМЗ-238НБ	1820	1743	1200	0,842	0,970	153,67
К-701(4K4)	ЯМЗ-240БМ	2150	1900	1328	1,108	1,220	221
К-701М(4K4)	ЯМЗ-240	2150	1900	1328	1,233	1,490	246
ДТ-75М(гусеничний)	А-41	1870	1750	1200	0,362	0,420	66,25
ДТ-75Т(гусеничний)	Д-440	1930	1750	1293	0,380	0,515	69,9
T-70СМ(гусеничний просапний)	Д-241Л	2275	2100	1400	0,233	0,269	51,5
T-150(гусеничний)	СМД-60	2180	2005	1400	0,529	0,606	111,03
ДТ-175С(гусеничний)	СМД-66	2080	1900	1327	0,627	0,718	125,1
T-4А(гусеничний)	А-01М	1840	1700	1200	0,558	0,630	99,26
T-250(гусеничний)	Д-460.1	1948	1800	1270	0,973	1,098	184
Примітка. Двигун Д-440 має постійну потужність з високим запасом крутного моменту							

Номинальну потужність N_H визначають при стендових випробуваннях двигуна без вентилятора, повітроочисника і іншого допоміжного обладнання, а експлуатаційну N_e – з повним комплектом обладнання, враховуючи вентилятор, повітроочисник тощо. Оскільки значення потужностей N_e і N_H близькі між собою, то в наступних розрахунках слід використовувати номінальну потужність N_H , приймаючи $N_e = N_H$.

Значення потужності N_m , що відповідає режиму максимального перенавантаження двигуна, можна розрахувати за формулою:

$$N_m = M_{max} \cdot \omega_m = 0,105 M_{max} \cdot n_m \quad (1.1)$$

Значення максимального крутного моменту M_{max} і частоти обертання n_m при кутовій швидкості ω_m слід вибирати з таблиці 1.2.

Коефіцієнти пристосованості по крутному моменту (коефіцієнт запасу крутного моменту) k_M і по частоті обертання k_n у відповідності з теорією трактора розраховують за формулами:

$$k_M = \frac{M_{max}}{M_H}; \quad k_n = \frac{n_H}{n_m} \quad (1.2)$$

Вказані коефіцієнти характеризують властивість двигуна переборювати тимчасові перенавантаження при неминучих коливаннях сил опору, що діють як на трактор, так і на робочі машини. Чим більше значення k_M і k_n , тим довше двигун витримає тимчасові перенавантаження без перемикання передач трактора, а отже підвищується продуктивність, зменшується витрата палива, знижується втомленість тракториста, зменшується знос механізмів керування трактором.

Такі переваги при інших рівних умовах має двигун постійної потужності Д-440 трактора ДТ-75Т, у якого коефіцієнт $k_M = 1,355$.

На підставі дослідних даних встановлено, що стійка робота тракторного двигуна при малій ймовірності заглушування через перенавантаження забезпечується при дотриманні умови

$$M_y \leq 0,97 M_{\max} \quad (1.3)$$

де M_y – найбільше допустиме значення моменту сил опору на валу двигуна, кН·м.

Багато сучасних тракторів обладнані тахоспідометрами, що дозволяють оцінювати завантаження двигуна по частоті обертання. В зв'язку з цим необхідно визначити частоту обертання валу двигуна n_y , що відповідає режиму допустимого перенавантаження при

$$M_y = 0,97 M_{\max}.$$

Для цього слід отримати аналітичну залежність обертового моменту двигуна від частоти обертання. На прямолінійних ділянках ab і bc регуляторної характеристики (рис. 1.1) такі залежності мають вигляд:

$$M_{iab} = M_H \left(\frac{n_x - n_i}{n_x - n_H} \right) \quad (1.4)$$

$$M_{ibc} = M_H + (M_{\max} - M_H) \cdot \left(\frac{n_H - n_i}{n_H - n_m} \right) \quad (1.5)$$

В формулі (1.5) приймаємо $M_{ibc} = M_y = 0,97 M_{\max}$. Тоді відповідна цьому режиму частота обертання валу двигуна

$$n_y = n_H - \left(\frac{0,97 M_{\max} - M_H}{M_{\max} - M_H} \right) \cdot (n_H - n_m) \quad (1.6)$$

Порівнюючи значення n_y з показниками тахоспідометра в процесі роботи, можна підбирати такі передачі трактора, при яких фактична частота обертання валу двигуна n_i буде задовольняти умові стійкої роботи без заглушування: $n_i \geq n_y$. Тому для забезпечення стійкої роботи двигуна більш ефективне автоматичне перемикавання передач.

Коефіцієнт завантаження двигуна по потужності визначають за формулою:

$$\varepsilon_N = N_\varepsilon / N_H, \quad (1.7)$$

де N_ε - потужність двигуна при i -му завантаженні, кВт.

Під оптимальним, або найкращим, в межах даного завдання слід розуміти таке значення коефіцієнту завантаження двигуна ε_{Nopt} , при якому питома витрата палива g_ε мінімальна. Значення $g_{\varepsilon min}$ залежить від конструктивних особливостей самого двигуна і закономірностей зміни діючих сил опору. Чим більше нерівномірність цих сил, тим менше повинен бути коефіцієнт завантаження двигуна ε_N , так як потрібний більший запас потужності для переборення тимчасових перенавантажень. Нерівномірність сил опору характеризується коефіцієнтом варіації моменту цих сил на валу двигуна v_M . При цьому кожному значенню v_M відповідає такий оптимальний коефіцієнт завантаження двигуна ε_{Nopt} , при якому має місце мінімальна витрата палива $g_{\varepsilon min}$. Але аналітичні методи визначення $g_{\varepsilon min}$ в функції v_M поки не розроблені через досить складний характер цієї залежності, тому при практичних розрахунках звичайно використовують наближені дослідні значення ε_{Nopt} (табл. 1.2).

Вибравши з таблиці 1.2 оптимальне значення коефіцієнта завантаження двигуна ε_{Nopt} для заданого варіанту, необхідно розрахувати відповідну частоту обертання валу двигуна $n_{\varepsilon opt}$, щоб по показникам тахоспідометра вибрати оптимальний режим роботи. Оскільки $\varepsilon_{Nopt} < 1$, то для розрахунку $n_{\varepsilon opt}$ слід використовувати формулу (1.7) для регуляторної гілки. Тоді отримаємо

$$\varepsilon_{Nopt} = \frac{N_{\varepsilon opt}}{N_H} = \frac{M_{\varepsilon opt} \cdot n_{\varepsilon opt}}{M_H \cdot n_H} = \frac{n_x \cdot n_{\varepsilon opt}}{M_H \cdot n_H} = \frac{n_x \cdot n_{\varepsilon opt} - n_{\varepsilon opt}^2}{n_x \cdot n_H - n_H^2} \quad (1.8)$$

звідки

$$n_{\varepsilon opt} = 0,5 n_x + \sqrt{0,25 n_x^2 - \varepsilon_{Nopt} (n_x \cdot n_H - n_H^2)} \quad (1.9)$$

Порівнюючи значення $n_{\varepsilon opt}$ з показниками тахоспідометра, можна підтримувати оптимальний

режим роботи двигуна за рахунок перемикання передач трактора. Більш ефективно автоматичне регулювання n_{opt} при безступінчастій зміні швидкості трактора, але такі автомати на вітчизняних тракторах поки не встановлюють.

Таблиця 1.2 – Оптимальні значення коефіцієнту завантаження двигуна в залежності від коефіцієнту варіації моменту сил опору

Двигун	Коефіцієнт завантаження ε_{Nopt} при коефіцієнті варіації v_M , %		
	10	20	30
Д-21А	0,921	0,836	0,750
Д-120	0,925	0,838	0,760
Д-144	0,906	0,837	0,756
Д-65	0,920	0,824	0,730
Д-240	0,905	0,811	0,718
Д-245	0,906	0,813	0,719
Д-260Т	0,907	0,814	0,719
Д-144-32	0,905	0,822	0,728
Д-65М1Л	0,921	0,823	0,729
СМД-25 (Д-181Т)	0,907	0,812	0,719
ЯМЗ-240	0,928	0,838	0,756
СМД-62	0,927	0,838	0,755
ЯМЗ-238НБ	0,904	0,805	0,698
ЯМЗ-240БМ	0,923	0,837	0,752
ЯМЗ-242	0,924	0,837	0,753
А-41	0,920	0,828	0,740
Д-440	0,921	0,829	0,741
Д-241Л	0,905	0,812	0,719
СМД-60	0,926	0,830	0,752
СМД-66	0,927	0,837	0,754
А-01М	0,920	0,827	0,748
Д-460.1	0,922	0,829	0,747

Оптимальний коефіцієнт завантаження двигуна по крутному моменту отримують з урахуванням формули (1.1) з рівняння

$$\varepsilon_{Mopt} = \frac{M_{\varepsilon opt}}{M_H} = \varepsilon_{n opt} \frac{n_H}{n_{\varepsilon opt}} \quad (1.10)$$

де $M_{\varepsilon opt}$ – оптимальний крутний момент, кН·м.

На регуляторній гілці ab (рис. 1.1) $n_H \leq n_{\varepsilon}$, чому відповідає $\varepsilon_M \leq \varepsilon_N$. Співвідношення $\varepsilon_M = \varepsilon_N$ має місце тільки при $n_H = n_{\varepsilon}$. При нормальному завантаженні двигуна значення n_H і $n_{\varepsilon opt}$ близькі між собою, тому наближено можна прийняти $\varepsilon_{Mopt} = \varepsilon_{Nopt}$.

Використовуючи нормальний закон розподілення, знаходять найменше M_{cmin} і найбільше M_{cmax} значення моменту сил опору на валу двигуна:

$$M_{cmin} = M_c - 3\sigma_M; \quad M_{cmax} = M_c + 3\sigma_M \quad (1.11)$$

де M_c – математичне очікування моменту сил опору, кН·м; σ_M – середнє квадратичне відхилення моменту, кН·м.

Значення $M_c = M_{\varepsilon opt}$ з урахуванням формули (1.10) прийме вигляд:

$$M_c = M_H \frac{\varepsilon_{Nopt} \cdot n_H}{n_{\varepsilon opt}} \quad (1.12)$$

Коефіцієнт варіації і середнє квадратичне відхилення моменту сил опору пов'язані співвідношеннями:

$$v_M = \frac{\sigma_M}{M_c} \cdot 100; \quad \sigma_M = \frac{M_c \cdot v_M}{100} \quad (1.13)$$

З урахуванням цих співвідношень отримують найбільше і найменше значення моменту сил опору на валу двигуна:

$$M_{cmin} = M_c \left(1 - \frac{3v_M}{100}\right); \quad M_{cmax} = M_c \left(1 + \frac{3v_M}{100}\right) \quad (1.14)$$

Якщо $M_{cmax} \leq M_y$, то в процесі роботи не має потреби перемикати передачі трактора через перевантаження двигуна, і навпаки. Значення $M_{cmax} > M_y$ свідчить про те, що оптимальний коефіцієнт завантаження ϵ_{Nopt} не гарантує повного виключення надмірних короточасних перевантажень двигуна – ймовірність їх буде досить мала.

При неможливості повного завантаження двигуна на конкретній роботі через обмеження числа машин і робочої швидкості рекомендують для економії палива переходити на частковий режим роботи двигуна за рахунок зменшення подачі палива і одночасного вмикання більш високої швидкості.

Часткові регуляторні характеристики двигуна при зниженій подачі палива показані на рисунку 1.1 штриховими лініями, які паралельні основній регуляторній гілці ab . Корегувальна гілка при цьому одна і та ж сама відповідно більш коротка. В зв'язку з цим робота двигуна на частковому режимі характеризується меншою перевантажувальною здатністю, що обмежує можливості широкого використання даного методу.

Практичне застосування розглянутих в даному завданні методів забезпечує більш повне використання потужності двигуна при одночасному зменшенні витрати палива і покращенні екологічних показників за рахунок зниження шкідливих викидів в атмосферу.

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 1.3 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Виконати в зошиті регуляторну і перевантажувальну (корегувальну) гілки регуляторної характеристики дизельного двигуна з всережимним регулятором. Вибрати взаємопов'язані значення крутного моменту $M_{кр}$, потужності N і частоти обертання n для основних режимів роботи і записати їх.
3. Розрахувати коефіцієнти пристосованості двигуна по крутному моменту k_m і частоті обертання k_n , обґрунтувати напрямки їх зміни з метою покращення експлуатаційних показників двигуна і трактора в цілому.
4. Визначити з умови без зупиночної стійкої роботи двигуна найбільше допустиме значення моменту сил опору M_y і відповідну йому частоту обертання n_y .
5. Вибрати оптимальне значення коефіцієнта завантаження двигуна по потужності ϵ_{Nopt} при заданому коефіцієнті варіації моменту сил опору v_M і розрахувати відповідну частоту обертання n_{opt} . Визначити також оптимальне значення коефіцієнту завантаження двигуна по крутному моменту ϵ_{Mopt} і порівняти його з ϵ_{Nopt} .
6. Використовуючи нормальний закон розподілення моменту сил опору на валу двигуна, визначити найменше M_{cmin} і найбільше M_{cmax} значення. Зробити висновок про необхідність перемикання передач трактора в процесі роботи.

Таблиця 1.3– Варіанти завдань

Номер варіанту	Трактор	Двигун	Коефіцієнт варіації моменту сил опору $v_M, \%$
1	2	3	4
1	T-25A	Д-21А	10
2	T-30	Д-120	20
3	T-30А-8	Д-120	30
4	T-40М	Д-144	10
5	T-40АМ	Д-144	20

6	ЮМЗ-6АКЛ	Д-65	30
---	----------	------	----

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
7	МТЗ-80	Д-240	10
8	МТЗ-82	Д-240	20
9	МТЗ-100	Д-245	30
10	МТЗ-102	Д-245	10
11	Т-142	Д-260Т	20
12	ЛТЗ-55А	Д-144-32	30
13	ЛТЗ-60АВ	Д-65М1Л	10
14	ЛТЗ-155	СМД-25 (Д-181Т)	20
15	Т-150К	ЯМЗ-240	30
16	Т-150К	СМД-62	10
17	К-700А	ЯМЗ-238НБ	20
18	К-701	ЯМЗ-240БМ	30
19	К-701М	ЯМЗ-242	10
20	ДТ-75МЛ	А-41	20
21	ДТ-75Т	Д-440	30
22	Т-70СМ	Д-241Л	10
23	Т-150	СМД-60	20
24	ДТ-175С	СМД-66	30
25	Т-4А	А-01М	10
26	Т-250	Д-460.1	30
27	Т-25А	Д-21А	20
28	Т-30	Д-120	10
29	Т-30А-8	Д-120	20
30	Т-40АМ	Д-144	10

7. Результати розрахунків для зручності оперативного аналізу представити у вигляді таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Форма звіту

Показник (параметр)	Отримане значення, од.вим.

Практичне заняття №2

Експлуатаційні показники тракторів. Обґрунтування енергозберігаючих і ґрунтозахисних режимів роботи

Мета роботи – набуття навичок самостійного вибору режиму вискоєфективного використання тракторів в залежності від умов роботи.

Загальні відомості.

При виконанні технологічного процесу потужність від двигуна трактора передається до сільськогосподарських машин. В зв'язку з цим однією з основних задач з позицій ресурсозбереження є обґрунтування такого швидкісного режиму, при якому втрати потужності в самому тракторі будуть мінімальними з врахуванням агротехнічних обмежень на буксування.

Таким чином, з позицій системного підходу отриманий в завданні 1 оптимальний режим завантаження двигуна доповнюється оптимізацією режиму роботи трактора при обмеженні шкідливої дії на ґрунт, пов'язаної з буксуванням.

Типорозмірний ряд вітчизняних тракторів визначається номінальним тяговим зусиллям з врахуванням можливості агрегування з різними сільськогосподарськими машинами. Номінальним називають тягове зусилля трактора базової моделі, що реалізується на стерні колосових культур нормальної твердості і вологості на суглинистому чорноземі при допустимому рівні буксування.

По даному показнику прийнято десять класів сільськогосподарських тракторів: 0,2; 0,6; 0,9; 1,4; 2; 3; 4; 5; 6; 8.

Кожному тяговому класу відповідає визначений діапазон номінальних тягових зусиль $P_{кр\ n}$ (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Тягові класи тракторів і діапазони номінальних тягових зусиль

Тяговий клас	Номінальні тягові зусилля, кН	Тяговий клас	Номінальні тягові зусилля, кН
0,2	1,8...5,4	3	27...36
0,6	5,4...8,1	4	36...45
0,9	8,1...12,6	5	45...54
1,4	12,6...18	6	54...72
2	18...27	8	72...108

Верхні границі кожного діапазону номінальних тягових зусиль в таблиці також відносяться до відповідного тягового класу. Номінальне тягове зусилля трактора розраховують за формулою:

$$P_{кр\ n} = mg(\varphi_d \lambda - f),$$

де m – експлуатаційна маса трактора, т; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; φ_d – коефіцієнт зчеплення рушіїв трактора з ґрунтом при допустимому буксуванні; λ – частина ваги трактора, що приходить на рушії (коефіцієнт навантаження ведучих коліс); f – коефіцієнт опору коченню трактора.

При практичних розрахунках користуються спрощеним рівнянням:

$$P_{кр\ n} = G_n \varphi_{кр\ n} = mg \varphi_{кр\ n}, \quad (2.1)$$

де G_n – номінальна експлуатаційна вага трактора, що відповідає допустимому (номінальному) буксуванню, кН; $\varphi_{кр\ n}$ – коефіцієнт використання зчіпної ваги трактора при допустимому номінальному буксуванні.

В процесі чисельних тягових випробувань тракторів отримані наступні значення $\varphi_{кр\ n}$: 0,37...0,39 – для колісних з формулою 4К2; 0,4...0,45 – для колісних з формулою 4К4; 0,5...0,6 – для гусеничних.

Підставляючи в формулу (2.1) значення $\varphi_{кр\ n}$ стосовно до заданого типу трактора, знаходять відповідне номінальне тягове зусилля $P_{кр\ n}$. Потім по значенню $P_{кр\ n}$ з таблиці 2.1 слід

вибрати відповідний тяговий клас трактора і порівняти з тяговим класом трактора, заданого в таблиці 2.3. При цьому з врахуванням використання усереднених дослідних даних можливі деякі розходження, які слід стисло пояснити.

Знання номінального тягового зусилля трактора і відповідного тягового класу необхідне для правильного агрегування трактора з відповідними сільськогосподарськими машинами. Звичайно в каталогах по сільськогосподарській техніці вказують тяговий клас трактора, з яким слід агрегувати конкретну машину.

Але слід відмітити, що тяговий клас трактора недостатньо повно характеризує його експлуатаційні показники при роботі в складі агрегатів різного призначення. До таких основних показників продуктивність відповідних агрегатів, витрата використовуваних ресурсів, витрати праці тощо. Вказані експлуатаційні показники залежать безпосередньо від потужності, тому більш об'єктивною була б класифікація тракторів по потужності, яка одночасно визначає і можливе тягове зусилля при заданій вазі трактора.

Оптимальний енергозберігаючий режим роботи трактора характеризується найменшими втратами потужності і в самому тракторі при її передачі до робочої машини і відповідає максимуму тягового ККД.

Значення тягового ККД трактора можна визначити по одній з двох еквівалентних формул:

$$\eta_T = \frac{N_{кр}}{N}, \quad (2.2)$$

або

$$\eta_T = \eta_{тр} \eta_f \eta_\delta, \quad (2.3)$$

де N , $N_{кр}$ - реалізована потужність двигуна і відповідна тягова потужність трактора, кВт; $\eta_{тр}$, η_f , η_δ - ККД, що враховують відповідно втрати потужності в трансмісії, на самопересування трактора і на буксування.

В наступних розрахунках з міркувань зручності та більшої наочності слід використовувати формулу (2.3).

При встановленому режимі роботи можна прийняти $\eta_{тр} = 0,88$, а значення η_f у відповідності з теорією трактора розрахувати за формулою:

$$\eta_f = \frac{P_{кр}}{P_k} = \frac{P_{кр}}{P_{кр} + P_f} = \frac{\varphi_{кр}}{\varphi_{кр} + f}, \quad (2.4)$$

де P_k , $P_{кр}$ - дотична сила тяги і тягове зусилля трактора, кН; P_f - сила опору коченню трактора, кН; $P_f = mgf$, $\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{G} = \frac{P_{кр}}{mg}$ - коефіцієнт використання експлуатаційної ваги трактора; $G = mg$ - експлуатаційна вага трактора, кН; f - коефіцієнт опору коченню трактора (таблиця 2.2).

Значення η_δ залежить від коефіцієнту буксування наступним чином:

$$\eta_\delta = 1 - \delta \quad (2.5)$$

Коефіцієнт буксування δ з достатньою точністю можна визначити за емпіричною формулою:

$$\delta = \frac{a\varphi_{кр}}{b - \varphi_{кр}}. \quad (2.6)$$

Значення емпіричних коефіцієнтів, отриманих в результаті узагальнення багатьох експериментальних даних, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Значення a , b , f для тракторів

Тип трактора	Стерня			Поле, підготовлене під посів		
	a	b	f	a	b	F
4К2 (КРР)	0,141	0,615	0,09	0,248	0,712	0,18
4К4 (КРР)	0,193	0,919	0,09	0,212	0,880	0,18
4К4 (КОР)	0,110	0,773	0,09	0,0834	0,609	0,18
Гусеничні	0,0089	0,777	0,07	0,0441	0,869	0,10

Примітка. КРР - колеса різного розміру; КОР - колеса однакового розміру

На підставі формул (2.3)...(2.6) отримаємо наступний вираз для тягового ККД трактора:

$$\eta_{\tau} = \eta_{\tau p} \left(\frac{\varphi_{кр}}{\varphi_{кр} + f} \right) \left(1 - \frac{a \varphi_{кр}}{b - \varphi_{кр}} \right) \quad (2.7)$$

З умови $\frac{d\eta_{\tau}}{d\varphi_{кр}} = 0$ знаходимо оптимальне значення $\varphi_{кр opt}$, що забезпечує максимум

тягового ККД трактора:

$$\varphi_{кр opt} = c \pm \sqrt{c^2 - d}, \quad (2.8)$$

$$\text{де } c = \frac{bf(1+a)}{b-(1+a)(b-f)}; d = \frac{b^2 f}{b-(1+a)(b-f)}$$

У формулі (2.8) перед коренем слід прийняти знак «+» при $c < 0$ і $d < 0$, а в інших випадках – знак «-». Далі розраховуємо оптимальне тягове зусилля трактора:

$$P_{кр opt} = G \varphi_{кр opt} = mg \varphi_{кр opt}. \quad (2.9)$$

Для оптимального режиму роботи трактора при $\varphi_{кр} = \varphi_{кр opt}$ коефіцієнт буксування

$$\delta_{opt} = \frac{a \varphi_{кр opt}}{b - \varphi_{кр opt}} \quad (2.10)$$

Потім розраховуємо оптимальну робочу швидкість трактора:

$$v_{opt} = v_{тоpt} (1 - \delta_{opt}), \quad (2.11)$$

де $v_{тоpt}$ – оптимальна теоретична швидкість, м/с.

Для визначення $v_{тоpt}$ з урахуванням виразу (2.4) використовуємо рівняння

$$P_{кр opt} = P_{коpt} - mgf = \frac{N_H \varepsilon_N \eta_{\tau p}}{v_{тоpt}} - mgf, \quad (2.12)$$

Звідки

$$v_{тоpt} = \frac{N_H \varepsilon_N \eta_{\tau p}}{P_{кр opt} + mgf}, \quad (2.13)$$

де $P_{коpt}$ – оптимальна дотична сила тяги трактора, кН.

З урахуванням формули (2.13) знаходимо оптимальну робочу швидкість

$$v_{opt} = \frac{N_H \varepsilon_N \eta_{\tau p} (1 - \delta_{opt})}{P_{кр opt} + mgf} \quad (2.14)$$

Значення номінальної потужності двигунів тракторів N_H вказані в таблиці 1.2, а значення коефіцієнту завантаження двигуна ε_N ККД трансмісії трактора $\eta_{\tau p}$ (при відсутності більш достовірних даних) можна прийняти наступними: $\varepsilon_N = 0,9$; $\eta_{\tau p} = 0,88$.

Таким чином, рівняння (2.9), (2.10) та (2.14) дозволяють визначити основні показники енергозберігаючого режиму роботи трактора. Але по завданню можливий і розширений, дослідницький варіант виконання даного пункту. Тоді експлуатаційну вагу трактора слід представити у вигляді суми:

$$G = G_o + G_6 + G_d = G_o (1 + \gamma_6 + \gamma_d) = m_o g (1 + \gamma_6 + \gamma_d), \quad (2.15)$$

де G_o – базова експлуатаційна вага трактора, кН; G_6 – вага баластних вантажів, кН; G_d – додаткове навантаження на ходову частину трактора, що створюється гідрозбільшувачем зчпної ваги (ГСВ) або іншим довантажувальним пристроєм, кН; $\gamma_6 = G_6 / G_o$; $\gamma_d = G_d / G_o$; m_o – базова експлуатаційна маса трактора, т.

Теоретичну швидкість трактора v_{τ} також доцільно розраховувати за формулою:

$$v_{\tau} = \frac{r \omega}{i_{\tau p}} = \frac{r \pi n}{30 i_{\tau p}} = 0,105 \frac{r n}{i_{\tau p}}, \quad (2.16)$$

де r – радіус кочення колеса або радіус початкового кола ведучої зірочки (у гусеничних тракторів), м; ω – кутова швидкість валу двигуна, рад/с; $i_{\tau p}$ – передаточне число трансмісії трактора; n – частота обертання при заданому навантаженні, об/хв. При нормальному завантаженні двигуна наближено можна прийняти $n = n_n$.

Коефіцієнт використання експлуатаційної ваги трактора $\varphi_{кр}$ з урахуванням формул (2.4), (2.6), (2.15) та (2.16) можна представити в такому вигляді:

$$\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{G} = \frac{P_{кр} - P_f}{G} = \frac{N_H i_{\tau p}}{m_o m_n} \left[\frac{\varepsilon_N \eta_{\tau p}}{0,105 (1 + \gamma_6 + \gamma_d)} \right] - f. \quad (2.17)$$

Прийнявши в цьому рівнянні $\varphi_{кр} = \varphi_{крорт}$ з врахуванням виразу (2.8), отримаємо оптимальне співвідношення між основними експлуатаційними параметрами трактора при $\eta_T \rightarrow \max$:

$$\left(\frac{N_H i_{тр}}{m_o m_H} \right)_{opt} = \frac{0,105g(1+\gamma_6+\gamma_d)(\varphi_{крорт}+f)}{\varepsilon_N \eta_{тр}} \quad (2.18)$$

Права частина цього рівняння без баластних вантажів ($\gamma_6 = 0$) і ГСВ ($\gamma_d = 0$) представляє собою приблизно постійну величину для однотипних тракторів на одному і тому самому ґрунтовому фоні. Відповідно для забезпечення максимуму тягового ККД трактора співвідношення між його експлуатаційними параметрами в лівій частині рівняння (2.18) також повинно залишатися постійним. Підтримання такої постійності можливо в основному за рахунок зміни передаточного числа трансмісії при перемиканні передач. При наявності баластування і ГСВ права частина рівняння (2.18) збільшується у визначеному діапазоні. Відповідно при інших рівних умовах необхідно пропорційно збільшувати і ліву частину за рахунок збільшення передаточного числа трансмісії $i_{тр}$, тобто за рахунок зменшення робочої швидкості трактора. Знаючи діапазон зміни правої частини рівняння (2.18), можна визначити діапазон зміни $i_{тр}$. Можна дослідити також ефективність баластування і ГСВ на різних ґрунтових фонах стосовно до різних типів тракторів. Можна вирішити і зворотну задачу синтезу, тобто задати бажане значення $i_{тр}$ і визначити необхідні значення γ_6 або γ_d для роботи в оптимальному режимі.

Рівняння (2.18) з врахуванням сучасних тенденцій розвитку тракторобудування можна виразити і в функції енергонасиченості трактора:

$$\left(\frac{E}{v_T} \right)_{opt} = \frac{g(1+\gamma_6+\gamma_d)(\varphi_{крорт}+f)}{\varepsilon_N \eta_{тр}}, \quad (2.19)$$

де $E = N_H / m_o$ – енергонасиченість трактора, кВт/т.

З цього рівняння видно, що із зростанням енергонасиченості тракторів для забезпечення максимуму тягового ККД повинна пропорційно збільшуватися швидкість руху. З рівняння (2.19) також видно, що застосування баластних вантажів і ГСВ знижує швидкість руху трактора.

На підставі рівнянь (2.17)–(2.19) шляхом моделювання на ЕВМ можна отримати багатоваріантні оптимальні рішення з врахуванням різноманітності робіт, що виконуються трактором в складі різних агрегатів в істотно різних природно-виробничих умовах.

Далі необхідно порівняти розрахункове значення коефіцієнту буксування $\delta_{орт}$, отримане для оптимального режиму роботи, з допустимими значеннями: $\delta_d = 0,15$ – для колісних тракторів з формулою 4К4; $\delta_d = 0,17$ – для тракторів з формулою 4К2; $\delta_d = 0,05$ – для гусеничних тракторів. Якщо виявиться, що $\delta_{орт} > \delta_d$, то по допустимому буксуванню δ_d слід визначити відповідне значення тягового зусилля $P_{крд}$, а також допустиму робочу швидкість v_d . При цьому вираз (2.6) слід представити у вигляді:

$$\delta_d = \frac{a\varphi_{крд}}{b - \varphi_{крд}} \quad (2.20)$$

Звідки знайти допустимий коефіцієнт використання експлуатаційної ваги трактора:

$$\varphi_{крд} = \frac{b\delta_d}{a + \delta_d} \quad (2.21)$$

Підставивши це значення $\varphi_{крд}$ в формулу (2.9), отримаємо допустиме тягове зусилля трактора по буксуванню:

$$P_{крд} = mg\varphi_{крд} \quad (2.22)$$

Потім можна визначити відповідну швидкість руху:

$$v_d = \frac{N_H \varepsilon_N \eta_{тр}(1 - \delta_d)}{P_{крд} + mgf} \quad (2.23)$$

На підставі рівнянь (2.2)–(2.23) можна обґрунтувати оптимальний енергозберігаючий режим роботи трактора з врахуванням допустимих меж негативної дії на ґрунт по буксуванню.

Але, як буде показано в наступних завданнях, такий режим роботи не завжди оптимальний для всього агрегату при істотному впливі швидкості на тяговий опір робочих машин.

Основні експлуатаційні показники трактора, що відповідають оптимальному і допустимому режимам роботи, наближено можна визначити і по тяговій характеристиці, наведений

на рисунку 2.1. Максимум тягового ККД трактора у відповідності з формулою (2.2) має місце на передачі з найбільшою тяговою потужністю (третя передача). Тягове зусилля $P_{кр\text{ опт}}$ і робочу швидкість $v_{\text{опт}}$ трактора на цій передачі наближено можна прийняти оптимальними. Допустимі значення тягового зусилля $P_{кр\text{ д}}$ і робочої швидкості $v_{\text{д}}$ отримаємо при $\delta = \delta_{\text{д}}$.

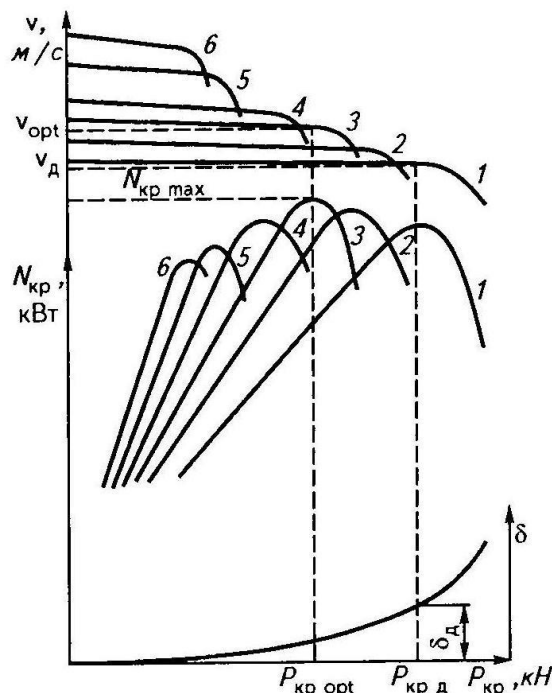


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд тягової характеристики трактора

Таблиця 2.3 Варіанти завдань

Номер варіанта	Трактор	Колісна формула	Тяговий клас	Маса, т	Грунтовий фон
1	2	3	4	5	6
1	МТЗ-102	4К4 (КРР)	1,4	4,345	Стерня
2	Т-150К	4К4 (КОР)	3	8,092	Стерня
3	Т-4А	Гусеничний	4	9,010	Стерня
4	ДТ-175С	Гусеничний	3	7,622	Стерня
5	ЮМЗ-6АКЛ	4К2 (КРР)	1,4	3,500	Поле під посів
6	Т-142	4К4 (КРР)	2	4,840	Стерня
7	ЛТЗ-55А	4К4 (КРР)	0,9	3,157	Поле під посів
8	К-701	4К4(КОР)	5	12,900	Стерня
9	ДТ-175С	Гусеничний	3	7,622	Поле під посів
10	ДТ-75Т	Гусеничний	3	6,420	Стерня
11	Т-70СМ	Гусеничний, просапний	2	4,444	Поле під посів
12	Т-150	Гусеничний	3	7,460	Поле під посів
13	Т-250	Гусеничний	5	12,200	Стерня
14	Т-150К	4К4 (КОР)	2	4,720	Поле під посів
15	ЛТЗ-60АВ	4К4 (КРР)	1,4	3,490	Поле під посів
16	Т-25А	4К2 (КРР)	0,6	1,885	Поле під посів
17	Т-30	4К2 (КРР)	0,6	2,370	Поле під посів
18	Т-30А-80	4К4 (КРР)	0,6	2,430	Стерня
19	Т-40М	4К2 (КРР)	0,9	2,620	Стерня
20	К-701М	4К4 (КОР)	5	13,800	Поле під посів

21	Т-30А-80	4К4 (КРР)	0,6	2,530	Поле під посів
22	ЛТЗ-155	4К4 (КОР)	2	5,610	Поле під посів

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
23	Т-40АМ	4К4 (КРР)	0,9	2,880	Поле під посів
24	К-700А	4К4 (КОР)	5	12,200	Стерня
25	Т-25А	4К2 (КРР)	0,6	1,885	Стерня
26	ДТ-75М	Гусеничний	3	7,205	Поле під посів
27	МТЗ-80	4К2 (КРР)	1,4	3,486	Стерня
28	МТЗ-82	4К4 (КРР)	1,4	3,780	Поле під посів
29	МТЗ-100	4К2 (КРР)	1,4	4,125	Поле під посів
30	ЛТЗ-60АВ	4К4 (КРР)	1,4	3,490	Стерня

Примітка. КРР – колеса різного розміру (діаметру); КОР – колеса однакового розміру (діаметру).

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 2.3 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
 2. Визначити номінальне тягове зусилля $P_{кр.н}$ заданого трактору і порівняти його зі значенням по тяговому класу.
 3. Визначити оптимальний по максимуму тягового ККД енергозберігаючий режим роботи трактора і відповідні значення тягового зусилля $P_{кпорт}$, робочої швидкості $v_{орт}$ і коефіцієнта буксування $\delta_{орт}$.
 4. Порівняти $\delta_{орт}$ з допустимими по агротехнічним вимогам буксуванням δ_d і при $\delta_{орт} > \delta_d$ визначити допустимі значення тягового зусилля трактора $P_{кр д}$ і робочої швидкості v_d .
 5. Показати оптимальні і допустимі по буксуванню значення тягового зусилля і робочої швидкості на тяговій характеристиці трактора.
- Отримані результати розрахунку для зручності аналізу представити у вигляді таблиці 1.4. Записати висновки по кожному пункту завдання.

Експлуатаційні показники мобільних сільськогосподарських машин. Обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи

Мета роботи – набуття навичок самостійного вибору енергозберігаючих режимів роботи мобільних сільськогосподарських машин з врахуванням агротехнічних вимог. При цьому результати економії енергії доповнюють раніше отримані показники ресурсозбереження по двигуну і трактору.

Загальні відомості.

В даному завданні під мобільними розуміють сільськогосподарські машини, що виконують технологічний процес при переміщенні по полю трактором або іншою енергомашиною.

Сили опору сільськогосподарської машини в загальному випадку пов'язані з тяговим опором і моментом сил опору на валу відбору потужності (ВВП). Тяговий опір сільськогосподарської машини в узагальненому вигляді характеризується раціональною формулою В.П.Горячкіна, отриманою ним стосовно до плугів:

$$R_M = m_M g f_M + k_{\Pi} a_M b_M + \varepsilon a_M b_M v^2, \quad (3.1)$$

де m_M – маса машини, т; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; f_M – коефіцієнт опору протаскування плуга у відкритій борозні; k_{Π} – питомий тяговий опір плуга, кН/м^2 ; a_M , b_M – відповідно глибина обробки і ширина захвату, м; ε – коефіцієнт швидкісного опору плуга, $\text{кН}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$; v – швидкість руху плуга, м/с .

Складові в формулі (3.1) характеризують відповідно опір переміщенню плуга у відкритій борозні і опорів, пов'язаних з деформуванням ґрунту і з наданням частинкам ґрунту кінетичної енергії. Розділивши обидві частини рівняння (3.1) на ширину захвату b_M , отримаємо питомий тяговий опір з врахуванням впливу швидкості $k_{\Pi v}$, приблизно однакове для всіх однотипних плугів:

$$k_{\Pi v} = \frac{R_M}{b_M} = m_{M,y} g f_M + k_{\Pi} a_M + \varepsilon a_M v^2, \quad (3.2)$$

де $m_{M,y} = m_M / b_M$ – питома маса плугів даного типу, т/м .

Доданки, що входять в рівняння (3.1) і (3.2), є загальними майже для всіх сільськогосподарських машин, в зв'язку з чим можна намітити загальні напрямки енерго- і ресурсозбереження. До таких перспективних напрямків відносяться: створення більш легких конструкцій машин з більш якісних матеріалів; обґрунтування оптимальних геометричних форм робочих органів машин з мінімальною витратою енергії на обробку технологічних матеріалів при високій якості роботи; оптимальне налаштування робочих органів і всієї машини на необхідний режим роботи; добра підготовка полів, включаючи вирівнювання поверхні, видалення каменів та пожнивних залишків; обробка ґрунту в стані фізичної стиглості при вологості 18...20%; високий рівень технічного і технологічного обслуговування машин; створення комфортних умов для роботи механізаторів на машинах і агрегатах.

З вказаної кількості напрямків ресурсозбереження в межах даного завдання розглядаються методи кількісної оцінки тягового опору сільськогосподарських машин і відповідних енерговитрат для наступного складання ресурсозберігаючих агрегатів. Не дивлячись на універсальний характер формул (3.1) і (3.2), їх практичне застосування ускладнене через складність отримання достатньо надійних значень f_M , k_{Π} і ε для машин різних типів. Виходячи з цього тяговий опір робочих машин при практичних розрахунках визначають з урахуванням довідкових даних по спрощеній формулі

$$R_M = k_{va} b_M, \quad (3.3)$$

де k_{va} – середній питомий тяговий опір машини даного типу з врахуванням впливу швидкості і кута схилу, кН/м .

З формули (3.2) видно, що вплив швидкості на тяговий опір машини виражається параболічною залежністю, наведеній на рисунку 3.1. Робочі швидкості сучасних

сільськогосподарських машин в більшості випадків вибирають в діапазоні від $v_0 = 1,4$ м/с (5 км/год) до $v = 3,33$ м/с (12 км/год), в межах якого залежність $k_v=f(v)$ з достатньою для практичних розрахунків точністю може бути замінена відрізком прямої cd. При цьому питомий тяговий опір машини в функції швидкості має вигляд:

$$\text{для плугів } k_v = a_M k_o [1 + \Delta k (v - v_o)]; \quad (3.4)$$

$$\text{для інших машин } k_v = k [1 + \Delta k (v - v_o)], \quad (3.5)$$

де a_M – глибина оранки, м; k_o – питомий тяговий опір плуга при $v=v_o$, кН/м²; Δk – відносне прирощування питомого тягового опору машини при збільшенні швидкості на 1м/с. При $v \leq v_o$ слід прийняти $\Delta k = 0$.

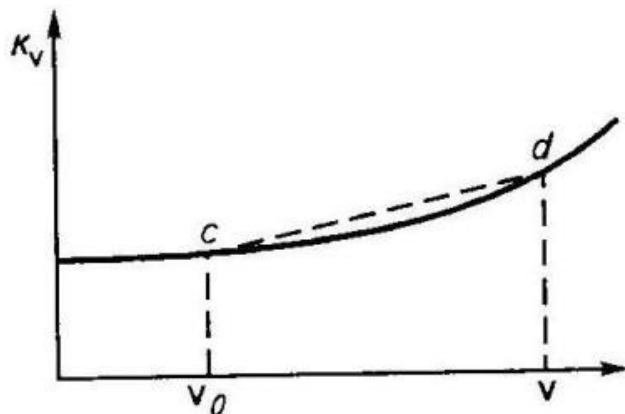


Рисунок 3.1 – Залежність питомого тягового опору робочої машини від швидкості

Числові значення k_o , k , Δk і питомі маси машин $m_{M,y}$ та зчіпок $m_{с,y}$ наведені в таблиці 3.1. В умовах нерівного рельєфу тяговий опір машини слід визначати з врахуванням опору підйому:

$$k_{va} = k_v + g m_{M,y} \sin \alpha, \quad (3.6)$$

де α – кут схилу, град.

Розрахунки по формулі (3.6) слід проводити для найбільш важкого випадку - роботи на підйомі. При роботі на спуску перед $\sin \alpha$ ставлять знак «-».

На підставі виразів (3.3)...(3.6) отримаємо узагальнену формулу для визначення тягового опору сільськогосподарських машин без приводу робочих органів через ВВП:

$$R_M = k_{va} b_M = (k_v + m_{M,y} g \sin \alpha) b_M. \quad (3.7)$$

Вихідні дані для розрахунків по цій формулі необхідно брати з таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Питомі тягові опори і маси машин, що виконують різні сільськогосподарські операції

Операція	k_o , кН/м ²	k , кН/м ²	Δk , кН/м ² /(м/с)	m , т/м	$m_{с,y}$, т/м
Оранка важких ґрунтів	63	-	0,216	0,616	-
Оранка середніх ґрунтів	52	-	0,180	0,616	-
Оранка легких ґрунтів	42	-	0,108	0,616	-
Обробка ґрунту плоскорізами	-	5	0,144	0,258	-
Рихлення ґрунту мотигною	-	0,6	0,072	0,451	-
Лущення стерні і дискування	-	1,6	0,108	0,254	-
Боронування	-	0,5	0,072	0,040	0,06
Суцільна культивуація	-	1,9	0,144	0,202	0,11
Міжрядна культивуація	-	1,6	0,108	0,234	-
Прикатування	-	0,7	0,072	0,243	0,05
Посів зернових	-	1,6	0,1	0,5	0,089
Посадка картоплі (СН-4Б, СКМ-6)	-	2,6	0,09	0,4	-
Посадка картоплі (СКС-4)	-	2,8	0,09	0,6	-
Посадка картоплі (КСМ-6)	-	3,2	0,09	0,728	-
Збирання картоплі (комбайнова)	-	11	0,1	2,9	-

Збирання (причіпними комбайнами)	силосних культур	-	1,6	0,072	1,39	-
-------------------------------------	---------------------	---	-----	-------	------	---

Звичайно глибину оранки приймають однаковою: $a_m = 0,22$, але можна вибрати її і з врахуванням місцевих умов.

Загальний тяговий опір причіпної частини всього агрегату в розрахунку на одну машину $R_{ам}$ отримаємо з врахуванням тягового опору зчіпки:

$$R_{ам} = k_a b_m, \quad (3.8)$$

де k_a – загальний питомий тяговий опір машин і зчіпки, кН/м.

При роботі на підйомі

$$k_a = k_{va} + m_{cy} g (f_c \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (3.9)$$

де m_{cy} – питома маса зчіпки, т/м; f_c – коефіцієнт опору коченню зчіпки (в розрахунках можна прийняти усереднене значення $f_c = 0,16$).

Для одномашинних агрегатів в формулі (3.9) слід прийняти $m_{cy} = 0$. На підставі формул (3.8) і (3.9) отримуємо загальний тяговий опір агрегату в розрахунку на одну машину без приводу робочих органів через ВВП.

Для тягово-приводних машин з приводом робочих органів через ВВП (посадка і збирання картоплі, збирання силосних культур) замість R_m слід розрахувати умовний тяговий опір

$$R_{MB} = (k_{va} + k_a) b_m, \quad (3.10)$$

де k_a – умовне питома навантаження на ВВП, кН/м:

$$k_a = P_B / b_m. \quad (3.11)$$

Величина P_B представляє собою умовний тяговий опір, що визначається з рівняння

$$P_B = \frac{N_B \eta_{TP}}{\eta_{BV} v_T} = \frac{N_B \eta_{TP} (1 - \delta_B)}{\eta_{BV} v}, \quad (3.12)$$

де N_B – потужність на ВВП, кВт; η_v – ККД приводу ВВП; v_T , v – теоретична і робоча швидкості машини (агрегату), м/с; δ_B – коефіцієнт буксування рушіїв трактора з врахуванням передачі частини потужності через ВВП.

При практичних розрахунках значення N_B наближено приймають пропорційним секундній подачі оброблюваного технологічного матеріалу:

$$N_B = N_{уд} q = N_{уд} b_m v u, \quad (3.13)$$

де $N_{уд}$ – питома потужність, що приходить на одиницю подачі, кВт/(кг/с); q – секундна подача, кг/с; u – питома кількість технологічного матеріалу в розрахунку на одну одиницю обробленої площі, кг/м².

Для $N_{уд}$ можна використовувати усереднені дослідні дані: 2,25 кВт/(кг/с) – посадка картоплі; 4 – збирання картоплі комбайном; 2,81 кВт/(кг/с) – збирання силосних культур.

На підставі формул (3.11)–(3.13) знаходимо умовний питомий опір на ВВП:

$$k_B = \frac{N_{уд} u \eta_{TP} (1 - \delta_B)}{\eta_{BV}}. \quad (3.14)$$

Підставивши в формулу (3.10) значення k_{va} з виразу (3.6) і k_B з виразу (3.14), можна розрахувати умовний тяговий опір тягово-приводної машини. Значення u вказані в таблиці 3.3, а для η_{TP} , δ_B , η_{BV} можна прийняти наближені значення: $\eta_{TP} = 0,88$, $\eta_{BV} = 0,95$, $\delta_B = 0,85 \delta_d$.

Значення допустимого коефіцієнту буксування δ_d наведені в завданні 2.

Потужність на валу двигуна, що необхідна для роботи сільськогосподарської машини в складі агрегату, знаходимо з урахуванням формул (3.8), (3.13) у вигляді суми

$$N_M = N_T + N_{Bд} = \frac{R_{ам} v}{\eta_T} + \frac{N_B}{\eta_B} = b_m v \left(\frac{k_a}{\eta_T} + \frac{N_{уд} u}{\eta_B} \right), \quad (3.15)$$

де N_T , $N_{Bд}$ – потужності двигуна, що споживаються на виконання тягових процесів і привід ВВП; η_T – тяговий ККД трактора. Можна прийняти усереднені значення η_T : 0,7 – на стерні; 0,6 – на полі, підготовленому під посів. Ґрунтовий фон стерня відповідає оранці, лущенню стерні і збиральним роботам, а іншим видам робіт відповідає поле, підготовлене під посів.

Питомі енерговитрати в розрахунку на одиницю обробленої площі, кДж/м², слід розраховувати за формулою:

$$E_M = \frac{N_M}{b_M v} = \frac{k_a}{\eta_T} + \frac{N_{уд}}{\eta_B}. \quad (3.16)$$

В цій формулі величини $k_a = E_{M,T} N_{уд} = E_{M,B}$ відповідають питомим енерговитратам в самій машині на тягові процеси і на привід робочих органів через ВВП. Пропорційно енерговитратам змінюється і витрата палива, тому для економії енергії і палива при роботі сільськогосподарської машини слід проводити технічні і організаційні заходи по зменшенню k_a і $N_{уд}$, включаючи розробку енергозберігаючих робочих органів і підвищення рівня обслуговування.

Номинальну потужність двигуна в розрахунку на одну машину $N_{н.м}$ отримаємо з врахуванням формули (3.15):

$$N_{н.м} = N_M / \varepsilon_N, \quad (3.17)$$

де ε_N – коефіцієнт завантаження двигуна. Наближено можна прийняти $\varepsilon_N = 0,9$.

На підставі викладеного слід обґрунтувати практичні рекомендації по енергозбереженню і економії палива при роботі сільськогосподарських машин. Можливі також розрахунки дослідницького характеру з врахуванням впливу основних факторів, що входять в рівняння (3.16). Наприклад, можна виявити вплив швидкості руху та глибини оранки на енерговитрати. Відомо, що приріст швидкості на 1 м/с може викликати збільшення тягового опору ґрунтообробних машин на 11...25%, а при роботі із затупленими лемішами тяговий опір плуга збільшується на 20...30%.

Слід відмітити необхідність врахування ймовірного характеру зміни сил опору, що діють на сільськогосподарські машини і агрегати в цілому (див. завдання 1) . Чим більше ступінь нерівномірності сил опору, тим з меншою ефективністю використовується потужність двигуна для корисної роботи, оскільки значна її частина витрачається на переборювання тимчасових перенавантажень.

В зв'язку з цим для більш ефективного використання потужності двигуна і зменшення питомих енерговитрат необхідно знати не тільки усереднені значення сил опору, розглянуті раніше, але також і їх ймовірні характеристики. Нерівномірність сил опору, що діють на сільськогосподарські машини, обумовлена мінливістю зовнішніх факторів, включаючи фізичні і гранулометричні властивості ґрунту, або інших оброблюваних матеріалів, нерівності рельєфу тощо.

Методику визначення основних ймовірних числових характеристик розглянемо на прикладі визначення тягового опору окремої сільськогосподарської машини R_M , характер зміни якого наближено відображено на рисунку 3.2.

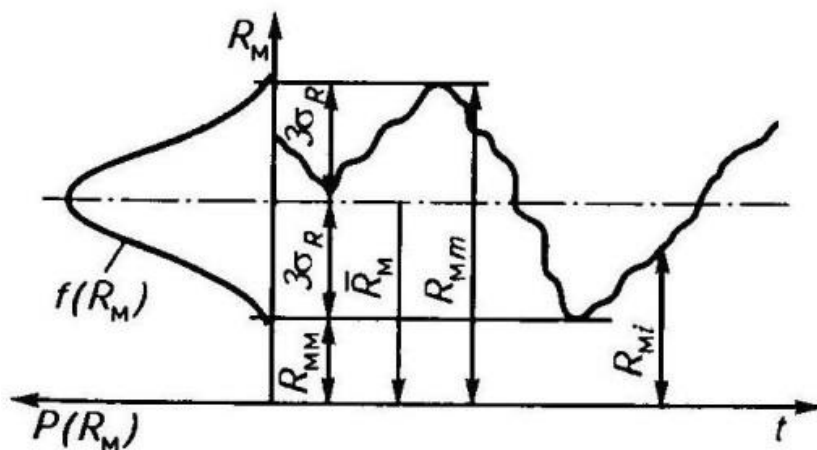


Рисунок 3.2 – Зміна тягового опору машини в процесі роботи

Чисельними експериментальними дослідженнями встановлено, що щільність розподілення $f(R_M)$, як показано на рисунку 3.2, з достатньою точністю підпорядковується нормальному закону:

$$f(R_M) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R_{Mi} - R_M)^2}{2\sigma_R^2}}, \quad (3.18)$$

де σ_R – середнє квадратичне відхилення, кН; R_{Mi} – значення тягового опору в i -й момент часу, кН; R_M – математичне очікування, кН.

В якості основних числових характеристик слід розрахувати математичне очікування R_M , середнє квадратичне відхилення σ_R , дисперсію $D_R = \sigma_R^2$, ступінь нерівномірності δ_R тягового опору і коефіцієнт варіації v_R :

$$R_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{Mi}; \quad (3.19)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{Mi} - R_M)^2}{n-1}}; \quad (3.20)$$

$$v_R = \frac{\sigma_R}{R_M}; \quad D_R = \sigma_R^2; \quad (3.21)$$

$$\delta_R = \frac{R_{Mm} - R_{MM}}{R_M} = \frac{6\sigma_R}{R_M} = 6v_R, \quad (3.22)$$

де n – число дослідних значень R_{Mi} .

Розрахунки по формулам (3.19)–(3.22) можна проводити при наявності результатів польових дослідів, включаючи осцилограми (рис. 3.2). При відсутності дослідних даних можна використовувати наведений нижче спрощений метод. При цьому в якості математичного очікування R_M слід приймати значення тягового опору, розрахованого за формулою (3.7). Потім для заданої операції вибрати коефіцієнт варіації тягового опору v_R (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнту варіації тягового опору

Операція	v_R
Оранка важких ґрунтів	0,15
Оранка середніх ґрунтів	0,11
Оранка легких ґрунтів	0,08
Обробка ґрунту плоскорізами	0,09
Рихлення ґрунту мотигною	0,06
Лущення стерні і дискування	0,02
Боронування	0,03
Суцільна культивуація	0,07
Міжрядна культивуація	0,06
Прикатування	0,04
Посів зернових	0,05
Посадка картоплі	0,06
Збирання картоплі (комбайнове)	0,10
Збирання силосних культур	0,12

Для вибраного значення v_R величини σ_R , D_R , δ_R розрахувати за формулами

$$\sigma_R = v_R R_M; \quad D_R = \sigma_R^2; \quad \delta_R = v_R$$

Далі для оцінки можливого перевантаження двигуна можна визначити найбільше значення тягового опору

$$R_{Mm} = R_M + 3\sigma_R.$$

Таблиця 3.3 – Варіанти завдань

Номер варіанту	Операція	Машина	Ширина захвату b_m , м	Швидкість руху v , м/с	Врожайність u , кг/м ²	Кут схилу α , град	Маса машини, m_m , т
1	Оранка важких ґрунтів	ПП-8-40	3,2	2,5	-	1	2,56
2	Оранка середніх ґрунтів	ПНИ-8-40	2,8...3,6	2,5	-	2	2,15
3	Оранка легких ґрунтів	ПЛН-5-35	1,75	2,77	-	3	0,8
4	Оранка середніх ґрунтів	ПНИ-5-40	1,75...2,25	2,22	-	0	0,98

5	Оранка важких ґрунтів	ПЛН-4-35	1,4	2,22	-	0	0,71
1	2	3	4	5	6	7	8
6	Оранка середніх ґрунтів	ПНИ-4-40	1,4...1,8	2,22	-	1	0,8
7	Оранка легких ґрунтів	ПНИ-3-40	1,05...1,35	2,22	-	2	0,586
8	Оранка середніх ґрунтів	ПЛН-3-35	1,05	2,22	-	0	0,475
9	Міжрядна культивування	КРН-4,2Б	4,2	2,22	-	3	0,871
10	Міжрядна культивування	КРН-5,6Б	5,6	2,22	-	0	1,3
11	Міжрядна культивування	КРН-8,4	8,4	2,22	-	0	2,142
12	Обробка ґрунту плоскорізами	КПШ-5	4,57	2,5	-	1	0,9
13	Обробка ґрунту плоскорізами	КПШ-11	10	2,5	-	2	2,59
14	Рихлення ґрунту мотигною	БМШ-15	14	2,77	-	0	6,8
15	Рихлення ґрунту мотигною	БМШ-20	20	2,77	-	3	8,6
16	Лущення стерні і дискування	ЛДГ-5А	5	2,77	-	0	1,2
17	Лущення стерні і дискування	ЛДГ-10А	10	2,77	-	1	2,48
18	Лущення стерні і дискування	ЛДГ-20	20	2,77	-	2	5,43
19	Боронування	БЗСС-1	0,95	2,5	-	0	0,0375
20	Суцільна культивування	КПС-4	4	2,77	-	2	0,927
21	Лущення стерні і дискування	ЛДГ-5А	15	2,5	-	3	3,85
22	Прикатування	ЗККШ-6	6,1	2,77	-	3	1,94
23	Посів зернових культур	СЗУ-3,6	3,6	2,5	-	1	1,38
24	Посадка картоплі	СН-4Б	2,8	1,4	0,24	2	1,015
25	Посадка картоплі	СКМ-6	4,2	1,67	0,28	0	1,78
26	Посадка картоплі	СКС-4	2,8	1,94	0,32	1	1,45
27	Посадка картоплі	КСМ-6	4,2	1,94	0,36	0	3,06
28	Збирання картоплі	ККУ-2А	1,4	1,4	2	2	4,52
29	Збирання силосних культур	КС-1,8	1,6	2,22	2	1	2,4

30	Збирання силосних культур	КСС-2,6	2,6	2,22	2,5	0	3,8
----	---------------------------	---------	-----	------	-----	---	-----

Зміст завдання

1. Виписати з таблиці 3.3 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Визначити загальні тягові опори $R_{ам}$ всього агрегату та $R_{мпричіпної}$ його частини (в розрахунку на одну машину)
3. Визначити потужність N_M , що необхідна для роботи сільськогосподарської машини, питомі енерговитрати E_M в розрахунку на одиницю обробленої площі і номінальну потужність двигуна трактора в розрахунку на одну машину $N_{нм}$.
4. Обґрунтувати практичні рекомендації по енергозбереженню і економії палива.
5. Визначити основні ймовірні числові характеристики тягового опору сільськогосподарської машини.

Результати розрахунків слід представити у вигляді таблиці 1.4. Записати висновки по кожному пункту завдання.

Практичне заняття №4

Комплектування ресурсозберігаючих машино-тракторних агрегатів

Мета роботи – самостійно навчитися складати машино-тракторний агрегат з врахуванням сучасних вимог ресурсозбереження, високої продуктивності і охорони навколишнього середовища.

Загальні відомості.

Значна частина трудових, матеріальних та фінансових ресурсів, що витрачаються в сільському господарстві, пов'язана з роботою машино-тракторних агрегатів (МТА). В зв'язку з цим від правильності комплектування МТА в залежності від умов їх роботи в значному ступеню залежить ефективність всього сільськогосподарського виробництва.

Машино-тракторний агрегат, як відомо, складається з джерела енергії (двигуна трактора), передаточного механізму (трансмисії), допоміжних пристроїв (причіпного або навісного механізмів, зчіпки) і робочих машин.

В завданнях 1...3 розглянуті окремі задачі обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи двигуна, трактора і сільськогосподарської машини, які не можуть забезпечити роботу всього агрегату в ресурсозберігаючому режимі. Виходячи з цього в даному завданні передбачається рішення більш загальної задачі забезпечення роботи в ресурсозберігаючому режимі всього МТА.

Необхідний ресурсозберігаючий діапазон значень потужності трактора для кожної операції в залежності від довжини гону слід вибрати з таблиці 4.1 з врахуванням наступних наукових положень. Дослідженнями встановлено, що кожному сполученню природно-виробничих умов (в тому числі довжини гону) відповідає така оптимальна потужність двигуна трактора $N_{н\text{ опт}}$, при якій комплексний показник ресурсозбереження – приведені витрати C_{Π} (грн/га) мінімальні, тобто $C_{\Pi} = C_{\Pi\text{ min}}$. Якщо оптимальна потужність по вказаному критерію не задовольняє яким-небудь місцевим умовам, включаючи складні погодні умови, нехватку механізаторів та інші, то можливо прийняття компромісного рішення. Так, при нехватці механізаторів бажано використовувати більш високопродуктивні агрегати на базі тракторів підвищеної потужності, але при цьому приведені витрати повинні залишатися близькими до мінімальних. Схематично таке компромісне рішення показано на рисунку 4.1 Наприклад, задаємо допустиме відхилення ΔC_{Π} мінімальних приведених витрат $C_{\Pi\text{ min}}$ отримаємо відповідне компромісне значення потужності $N_{н.к.}$, яке більше оптимального $N_{н\text{ опт}}$ і забезпечує приріст продуктивності агрегату ΔW в порівнянні з оптимальним рішенням. Практичні розрахунки показали, що відхилення від мінімальних витрат $C_{\Pi\text{ min}}$ всього на 5% ($\Delta C_{\Pi} = 0,05 C_{\Pi\text{ min}}$) забезпечує приріст продуктивності ΔW відповідних агрегатів на 35...40%, що пояснюється незначною увігнутістю графіка залежності $C_{\Pi} = f(N_{н})$ в області мінімуму. Отриманий діапазон компромісних значень потужності в достатньому ступеню задовольняє сучасним вимогам ресурсозбереження і високої продуктивності МТА.

Рекомендовані діапазони ресурсозберігаючих потужностей тракторів $N_{н\text{ опт}} \dots N_{н.к.}$ при $\Delta C_{\Pi} = 0,05 C_{\Pi\text{ min}}$ наведені в таблиці 4.1 для заданих операцій в залежності від класів довжини гону L , прийнятих при нормуванні механізованих робіт.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані діапазони значень ресурсозберігаючої потужності

Технологічна операція	Діапазони значень потужності, кВт, при довжині гону, м			
	300...400	400...600	600...1000	Більше 1000
Оранка легких ґрунтів	61...105	65...114	73...132	95...178
Оранка середніх ґрунтів	70...124	75...135	84...156	109...213
Оранка важких ґрунтів	76...134	80...145	90...168	117...230
Лущення стерні і дискування	61...110	74...138	83...160	106...217
Боронування (зубове)	26...41	32...52	37...61	43...75

Суцільна культивуація	55...95	67...119	84...155	99...187
Прикочування	30...51	53...62	40...74	47...90

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Посів зернових	54...87	59...94	62...101	69...114
Міжрядна культивуація	50...80	56...91	60...99	71...121

Примітки: 1. Для більш повного використання потужності двигуна глибину оранки доцільно приймати 0,22 м на середніх і важких ґрунтах і 0,25 м на легких ґрунтах. З врахуванням місцевих умов можна прийняти і інші значення глибин оранки.

2. Потужності для боронування і прикочування відповідають застосуванню середніх борін і кільчато-шпорових катків.

3. Посів зернових виконується вузькорядними сівалками.

Якщо умови виконання технологічної операції нормальні (відсутні знаки «+» у відповідних графах таблиці 4.5), то потужність відповідного трактора слід вибрати в лівій половині діапазону значень таблиці 4.1, як можна ближче до оптимальної потужності $N_{н\text{ опт}}$.

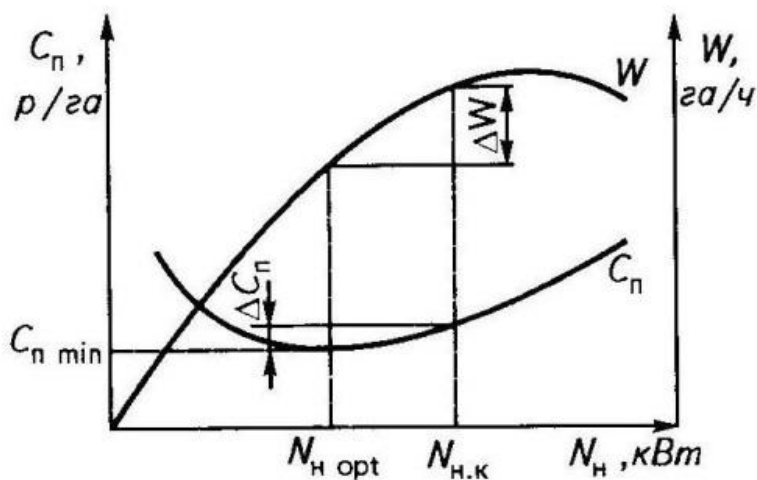


Рисунок 4.1 - Залежності продуктивності МТА і приведених витрат від потужності двигуна

Для виконання операції в складних умовах (знаки «+» в графах СП або НМ) необхідно вибрати потужність трактора в правій половині діапазону потужностей таблиці 4.1. На переувільнених ґрунтах (знак «+» в графі ПП таблиці 4.5) переважно використовувати гусеничні трактори з меншим питомим тиском на ґрунт, якщо в достатньому ступеню задовольняються інші вимоги.

При використанні одномашинних агрегатів (знак «+» в графі А1 таблиці 4.5) слід забезпечити нормальне завантаження двигуна. З врахуванням викладених особливостей вибирають трактор по даним таблиці 4.2, в якій вказані значення номінальної потужності двигуна N_n , експлуатаційної маси трактора m та енергонасиченості $E = N_n/m$. Трактори загального призначення можна використовувати на всіх операціях, крім міжрядної культивуації, а універсально-просапні – на всіх операціях (табл. 4.1).

Таблиця 4.2 – Основні показники тракторів

Трактор	Тяговий клас	Колісна формула (призначення)	Двигун	N_n , кВт	m , т	E , кВт/т
Т-25А	0,6	4К2(КРРУ)	Д-21А	18,38	1,885	9,75
Т-30	0,6	4К2(КРРУ)	Д-120	22,1	2,37	9,32
Т-30А-80	0,6	4К4(КРРУ)	Д-120	22,1	2,43	9,09
Т-40М	0,9	4К2(КРРУ)	Д-144	36,76	2,62	14,03
Т-40АМ	0,9	4К4(КРРУ)	Д-144	36,76	2,88	12,76

ЛТЗ-55А	0,9	4К4(КРРУ)	Д-144-32	39	3,157	12,35
ЮМЗ-6АКЛ	1,4	4К2(КРРУ)	Д-65	46,32	3,5	13,23

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
ЛТЗ-60АВ	1,4	4К4(КРРУ)	Д-65М1Л	46,32	3,49	13,27
МТЗ-80	1,4	4К2(КРРУ)	Д-240	55,22	3,486	15,84
МТЗ-82	1,4	4К4(КРРУ)	Д-240	55,22	3,78	14,61
ДТ-75М	3	ГЗ	А-41	66,25	7,25	9,19
ДТ-75Т	3	ГЗ	Д-440	69,9	6,42	10,89
МТЗ-100	1,4	4К2(КРРУ)	Д-245	73,6	4,125	17,84
МТЗ-102	1,4	4К4(КРРУ)	Д-245	73,6	4,345	16,94
Т-3К	2	4К2(КРРУ)	СМД-19Т	88,3	4,72	18,71
Т-4А	4	ГЗ	А-01М	99,26	9,01	11,02
ЛТЗ-155	2	4К4(КОРУ)	СМД-25	110	5,61	19,61
Т-150	3	ГЗ	СМД-60	111	7,46	14,88
Т-142	2	4К4(КРРУ)	Д-260Т	114	4,84	23,55
Т-150К	3	4К4(КОРО)	СМД-62	121,47	8,092	15,01
ДТ-175С	3	ГЗ	СМД-66	125,1	7,622	16,41
К-700А	5	4К4(КОРО)	ЯМЗ-238НБ	153,67	12,2	12,59
Т-250	5	ГЗ	Д-460.1	184	12,2	15,08
К-701	5	4К4(КОРО)	ЯМЗ-240БМ	221	12,9	17,13
К-701М	5	4К4(КОРО)	ЯМЗ-8423	246	13,8	17,83

Прийняті позначення: КРРУ – колеса різного розміру універсально-просапного трактора; КОРУ – колеса однакового розміру універсально-просапного трактора; КОРО – колеса однакового розміру трактора загального призначення; ГЗ – гусеничний трактор загального призначення.

Колісні трактори 4К4 мають велику прохідність, тому при інших рівних умовах їх доцільно використовувати в складних погодних умовах (знак «+» в графі СП таблиці 4.5).

На цьому вибір трактора завершується. Але не виключається повторний вибір іншого трактора, якщо при наступних розрахунках двигун виявиться недовантаженим по тим чи іншим причинам.

Наступний етап ресурсозбереження – визначення оптимальної робочої швидкості $v_{орт}$ агрегату, що комплектується, і відповідного тягового зусилля трактора $P_{кр\text{ орт}}$. В якості критерію оптимальності доцільно використовувати мінімум питомої витрати енергії, кДж/м², при робочому ході агрегату:

$$E_p = \frac{N_{\Sigma} \varepsilon_N}{Bv} \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де ε_N – коефіцієнт завантаження двигуна; В – ширина захвату агрегату, м; v – швидкість руху при робочому ході агрегату, м/с.

Критерій (4.1) одночасно забезпечує і мінімум питомої витрати палива в розрахунок на 1 м² обробленої площі:

$$\theta_p = \frac{G_T}{3600Bv} = \frac{N_{\Sigma} \varepsilon_N}{3,6 \cdot 10^6 Bv} g_e, \quad (4.2)$$

де θ_p – питома витрата палива, кг/м²; G_T – годинна витрата палива двигуном, кг/год; g_e – питома витрата палива двигуном, г/(кВт·год).

При нормальному завантаженні двигуна значення g_e можна прийняти постійним. Тоді критерії (4.1) і (4.2) будуть еквівалентними. В зв'язку з цим наступне рішення задачі, що розглядається, виконано на основі критерію (4.1) з міркувань зручності і більшої наочності. При цьому викладена як загальна методика рішення стосовно до тягових і тягово-приводних агрегатів, так і спрощена окрема методика розрахунку ресурсозберігаючих тягових агрегатів.

Загальна методика розрахунку тягових і тягово-приводних агрегатів.

Критерій оптимальності (4.1) з врахуванням співвідношення $V=P_{кр}/k_d$ можна представити у вигляді

$$E_p = \frac{N_N \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) k_a}{P_{кр} v} = \frac{N(1 - \varepsilon_B)}{N_{кр}} = \frac{k_a}{\eta_T} \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

де $P_{кр}$ – тягове зусилля трактора, кН; k_a – питомий тяговий опір агрегату, кН/м; $N_{кр} = P_{кр} v$ – тягова потужність трактора, кВт; $\eta_T = N_{кр} / [N(1 - \varepsilon_B)]$ – тяговий ККД трактора; ε_B – частина потужності двигуна, що передається через ВВП.

Загальність критерію оптимальності (4.3) для тягових і тягово-приводних агрегатів підтверджується рівнянням (3.16), в якому другий доданок не залежить від швидкості v і ширини захвату B агрегату. Відповідно оптимальні значення швидкості v_{opt} і ширини захвату B_{opt} для агрегатів обох типів можна визначити по критерію (4.3), прийнявши для МТА $\varepsilon_B = 0$. При цьому питомі енерговитрати E_p у виразі (4.3) будуть відповідати тільки тяговим процесам, а повні енерговитрати при наявності ВВП отримаємо з врахуванням другого доданку з формули (3.16). Для наступного вирішення задачі необхідно виразити значення η_T і k_a у виразі (4.3) в функції теоретичної швидкості $v_{тагрегату}$.

Тяговий ККД трактора η_T отримаємо з (2.7) другого завдання, виразивши з врахуванням (2.12) значення $\varphi_{кр}$ в функції теоретичної швидкості:

$$\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{mg} = \frac{N_N \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP}}{mg v_T} - f = \frac{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP}}{g v_T} - f. \quad (4.4)$$

На підставі формул (2.6), (2.7) і (4.4) отримаємо коефіцієнт буксування δ і тяговий η_T ККД трактора у вигляді функцій енергонасиченості і теоретичної швидкості:

$$\delta = f_\delta(E_e v_T); \quad (4.5)$$

$$\eta_T = f_\eta(E_e v_T). \quad (4.6)$$

Питомий тяговий опір агрегату отримаємо з формули (3.9) в наступному вигляді (для роботи на підйомі):

$$k_a = k_{a0} + k_{a1} v = k_{a0} + k_{a1} v_T (1 - \delta), \quad (4.7)$$

$$\text{де } k_{a0} = k(1 - \Delta k v_0) + g(m_{m,y} \sin \alpha + m_{c,y} \psi_c);$$

$$k_{a1} = k \Delta k; \psi_c = f_c \cos \alpha + \sin \alpha.$$

Знак «-» перед $\sin \alpha$ слід прийняти при спуску.

Для плугів з врахуванням виразу (3.4) слід прийняти $k = a_m k_0$. Для одномашинних агрегатів знак «+» в графі А1 таблиці 4.5 через відсутність зчипки маємо $m_{c,y} = 0$. Таким чином, на підставі формул (4.5) і (4.7) питомий тяговий опір агрегату

$$k_a = f_k(E_e v_T). \quad (4.8)$$

Отже, критерій оптимальності (4.3) з врахуванням виразів (4.6) і (4.8) також є функцією енергонасиченості і теоретичної швидкості:

$$E_p = \frac{k_a}{\eta_T} = \frac{f_k(E, v_T)}{f_\eta(E, v_T)} = f_E(E, v_T). \quad (4.9)$$

Оптимальну теоретичну швидкість агрегату $v_{тоpt}$ отримаємо з виразу (4.9) по умові $dE_p/dv_T = 0$ у вигляді

$$v_{T opt} = e + \sqrt{e^2 - h}, \quad (4.10)$$

де e, h, μ_k – емпіричні коефіцієнти.

$$e = \frac{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP} [g f + E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP} \mu_k (1 + a)]}{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP} g \mu_k [b + f(1 + a)] + f(b + f) g^2},$$

$$h = \frac{[E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP}]^2 \{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP} \mu_k (1 + a)^2 + g[(1 + a) f - a b]\}}{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP} \mu_k g^2 [b + f(1 + a)]^2 + g^3 f(b + f)[b + f(1 + a)]},$$

$$\mu_k = \frac{k_{a1}}{k_{a0}} = \frac{k \Delta k}{k_{a0}}.$$

Всі необхідні вихідні дані для розрахунків по формулі (4.10) наведені в завданнях 2, 3, 4 стосовно тяговим МТА, що розглядаються.

Частина потужності ε_B двигуна, що передається через ВВП, для тягово-приводних агрегатів при необхідності можна наближено визначити за формулою (3.15):

$$\varepsilon_B = \frac{N_{y_d} u / \eta_B}{\frac{k_a}{\eta_T} + N_{y_d} u / \eta_B},$$

приймавши для k_a , η_T , u , N_{y_d} , η_B середні значення. При $v_T = v_{T \text{ opt}}$ з формули (4.4) отримаємо $\varphi_{kr \text{ opt}}$, а з формули (4.5) – δ_{opt} .

Оптимальна робоча швидкість МТА

$$v_{opt} = v_{T \text{ opt}}(1 - \delta_{opt}). \quad (4.11)$$

Потім можна розрахувати оптимальне тягове зусилля трактора (при підйомі):

$$P_{kr \text{ opt}} = \frac{N_N \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP}}{v_{T \text{ opt}}} mg - (f \cos \alpha + \sin \alpha). \quad (4.12)$$

Стосовно до тягових агрегатів в рівняннях (4.10)...(4.12) слід прийняти $\varepsilon_B = 0$, $\varepsilon_N = 0,9$, $\eta_{TP} = 0,88$. Якщо буксування δ_{opt} виявиться більше допустимого значення δ_d (див. завдання 2), то замість $v_{T \text{ opt}}$ слід визначити допустиму по буксуванню теоретичну швидкість $v_{T.d}$. Для цього необхідно спочатку за формулою (2.21) знайти допустиме значення $\varphi_{kr.d}$, а потім, приймавши $\varphi_{kr} = \varphi_{kr.d}$, отримаємо

$$v_{T.d} = \frac{E \varepsilon_N (1 - \varepsilon_B) \eta_{TP}}{g(\varphi_{kr.d} + f)}. \quad (4.13)$$

Підставивши значення $v_{T.d}$ і δ_{opt} у вирази (4.11) і (4.12), можна розрахувати допустиму робочу швидкість руху МТА v_d і відповідне тягове зусилля трактора $\varphi_{kr.d}$. Змінюючи значення E за рахунок баластування, можна корегувати v_{opt} і $P_{kr \text{ opt}}$ в бажаному напрямку.

З рівняння (4.4) видно, що із збільшенням частини потужності двигуна ε_B , що передається через ВВП, зменшуються значення v_{kr} і δ . Завдяки цьому трактори з високою енергонасиченістю E можуть працювати в оптимальному режимі, не перебільшуючи допустимих меж буксування δ .

Оптимальні значення швидкості v_{opt} і відповідного тягового зусилля трактора $P_{kr \text{ opt}}$ по критерію (4.3) наближено можна визначити і по тяговій характеристиці (при її наявності). Мінімум витрати енергії в формулі (4.3) наближено відповідає найменшому значенню функції

$$E_p = \frac{k_a}{v P_{kr}} \rightarrow \min. \quad (4.14)$$

Підставляючи в цю формулу з тягової характеристики послідовно значення швидкостей v і тягових зусиль трактора P_{kr} , що збільшуються, на різних передачах, а також відповідні питомі опори k_a МТА, розраховані за формулою (4.7), отримаємо v_{opt} і $P_{kr \text{ opt}}$ при $E_p = E_{p \text{ min}}$.

По пункту 4 завдання спочатку з урахуванням формули (4.12) слід визначити розрахункову оптимальну ширину захвату МТА:

$$B_{popt} = \frac{P_{kr \text{ opt}}}{k_a}. \quad (4.15)$$

Потім на підставі цієї формули знайти оптимальне розрахункове число машин:

$$n_{mpopt} = \frac{B_{opt}}{b_m}. \quad (4.16)$$

Значення ширини захвату однієї машини b_m вказані в таблиці 3.3. Фактичне оптимальне число машин в агрегаті $N_{m \text{ opt}}$ отримаємо на підставі умови:

$$n_{m \text{ opt}} \leq n_{mpopt}. \quad (4.17)$$

Далі знайдемо оптимальну ширину захвату агрегату

$$B_{opt} = b_m n_{mpopt}. \quad (4.18)$$

Для одномашинних агрегатів по значенню $B_{p \text{ opt}}$, розрахованому по формулі (4.15), слід вибрати відповідну сільськогосподарську машину з шириною захвату b_m , що відповідає умові $b_m \leq B_{p \text{ opt}}$. Якщо раніше отримано $\delta_{opt} > \delta_d$, то по формулі (4.15) слід розрахувати допустиму розрахункову ширину захвату МТА $B_{p.d}$, приймавши $P_{kr \text{ opt}} = P_{kr.d}$. Потім по формулам (4.16)...(4.18) обчислити допустимі значення $n_{m.p.d}$, $n_{m.d}$ і B_d .

Необхідний розрахунковий фронт зчіпки $\Phi_{c.p}$ треба визначати при двох і більшій кількості машин в складі агрегату ($n_m \geq 2$) за формулою

$$\Phi_{c.p} = (n_m - 1) b_m. \quad (4.19)$$

По розрахунковому значенню $\Phi_{с,р}$ вибрати з таблиці 4.3 зчіпку з фактичним фронтом Φ_c , виходячи з умови:

$$\Phi_c \geq \Phi_{с,р}.$$

Таблиця 4.3 – Основні параметри зчіпок

Зчіпка	Маса, т	Фронт зчіпки Φ_c , м
СП-11А	0,915	7,2
С-11У	0,7	11
СП-16	1,762	13,5
СГ-21 (для борін і котків типу ЗККШ-6А)	1,8	21

Фактичне завантаження трактора по тязі слід визначати з врахуванням дійсного значення коефіцієнту використання оптимального тягового зусилля $P_{кр\text{ опт}}$ (див. формулу (4.12)) у вигляді

$$\varepsilon_{кр, \Phi} = \frac{R_a}{P_{кр\text{ опт}}}. \quad (4.20)$$

Фактичний тяговий опір агрегату знаходимо з врахуванням виразу (4.7) у вигляді добутку $R_a = n_m \{ b_m k [1 + \Delta k (v_{орт} - v_0)] + m_m g \sin \alpha \} + m_c g (f_c \cos \alpha + \sin \alpha)$. (4.21)

Для плугів, як вказано раніше, слід прийняти $k = a_m k_0$, $n_m = 1$. Маси сільськогосподарських машин m_m і зчіпки m_c наведені в таблицях 3.3 і 4.3.

Якщо $\delta_{орт} > \delta_d$, то в рівняннях (4.20) і (4.21) замість оптимальних слід використовувати раніше отримані допустимі значення $P_{кр,д}$, $n_{м,д}$ і v_d .

Нормальному завантаженню трактора по тязі приблизно відповідають значення $\varepsilon_{кр} = 0,85 \dots 1$. Доступність значення $\varepsilon_{кр} = 1$ обумовлена тим, що в рівнянні (4.12) враховано допустимий коефіцієнт завантаження двигуна $\varepsilon_N = 0,9$. При $\varepsilon_{кр} < 0,85$ необхідно для економії палива перевірити можливість роботи з більш високою швидкістю при дотриманні агротехнічних обмежень швидкості руху МТА.

Фактичне завантаження двигуна оцінюють по дійсному значенню коефіцієнта завантаження $\varepsilon_{N\Phi}$, яке розраховують з врахуванням виразу (3.15) за формулою

$$\varepsilon_{N\Phi} = \frac{v}{N_H} \left(\frac{R_a}{\eta_T} + \frac{B N_{H2} u}{\eta_E} \right). \quad (4.22)$$

В цю формулу слід підставляти значення тягового ККД трактора, отримане з виразу (4.6), або використовувати усереднені довідкові дані: $\eta_T = 0,62 \dots 0,78$ на стерні; $\eta_T = 0,52 \dots 0,68$ на полі, підготовленому під посів. Менші значення відносяться до тракторів з колісною формулою 4К2, більші – до гусеничних тракторів. Як вказано раніше, ґрунтовий фон стерня відповідає в даному завданні оранці і лущенню, а поле, підготовлене під посів, – всім іншим операціям. Для тягових агрегатів також слід прийняти $\varepsilon_B = 0$, а для тягово-приводних МТА – $\eta_B = 0,95$.

Спрощена методика розрахунку тягових агрегатів. Ресурсозберігаючі тягові агрегати з достатньою точністю можна розрахувати і по спрощеній методиці з меншими витратами праці і часу. Можливість спрощення розрахунків пов'язана з тим, що у сучасних тракторів з високою енергонасиченістю коефіцієнт буксування $\delta_{орт}$, що відповідає критерію оптимальності (4.3), дорівнює або близький до допустимого значення δ_d . В зв'язку з цим на підставі формул (4.10) ... (4.13) і дослідних даних між $\delta_{орт}$ і δ_d встановлено наступне співвідношення

$$\delta_{орт} = \gamma \delta_d. \quad (4.23)$$

Поправочний коефіцієнт γ залежить від енергонасиченості трактора E , величини μ_k (формула 4.10) і типу трактора. Значення γ наведені в таблиці 4.4. При $\gamma = 1$ коефіцієнт буксування $\delta_{орт}$ часто перебільшує допустимі значення γ_d . Тоді режим роботи МТА в розрахунках можна наближено розглядати як оптимальний.

Таблиця 4.4 – Поправочний коефіцієнт γ

Тип трактора	Енергонасиченість E , кВт/т	Значення γ при μ_k					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2
		Стерня				Поле, підготовлене під посів	

4К4 (КОР)	8	0,81	0,949	1	1	0,906	1
	12	0,886	1	1	1	1	1
	16	0,938	1	1	1	1	1
	20	1	1	1	1	1	1
	24	1	1	1	1	1	1
4К4 (КРР)	8	1	1	1	1	1	1
	12	1	1	1	1	1	1
	16	1	1	1	1	1	1
	20	1	1	1	1	1	1
	24	1	1	1	1	1	1
4К2(КРР)	8	0,897	1	1	1	1	1
	12	0,967	1	1	1	1	1
	16	1	1	1	1	1	1
	20	1	1	1	1	1	1
	24	1	1	1	1	1	1
Гусеничні	8	0,7	0,856	0,984	1	1	1
	12	0,778	0,976	1	1	1	1
	16	0,856	1	1	1	1	1
	20	0,92	1	1	1	1	1
	24	0,984	1	1	1	1	1

Прийняті позначення: КОР – колеса однакового розміру; КРР – колеса різного розміру.

З таблиці 4.4 видно, що сучасні трактори з високою енергонасиченістю при $\mu_k \geq 0,1$ в більшості випадків не можуть забезпечити роботу тягових МТА в оптимальному енергозберігаючому режимі по критерію (4.3), так як δ_{opt} часто перебільшує δ_d .

Такому режиму роботи відповідають значення $\gamma = 1$. Режим роботи при $\mu_k = 0$ і постійному значенні k_a відповідає максимуму тягового ККД трактора: $\eta_T \rightarrow \max$, який може бути реалізований в межах допустимого буксування. Але більшість сільськогосподарських машин, як видно з таблиці 3.1, мають значення $\Delta k > 0$ і $\mu_k > 0$. Отже, питомі енерговитрати E_p агрегатів з такими машинами перебільшують мінімальні.

Наведені особливості обґрунтування енергозберігаючих режимів роботи МТА необхідно враховувати при розробці нових конструкцій тракторів і сільськогосподарських машин.

Наступні спрощені розрахунки по визначенню наближених оптимальних значень $v_{T opt}$, v_{opt} , $P_{кр opt}$ з врахуванням даних таблиці 4.4 слід виконувати в такій послідовності. Спочатку з врахуванням даних таблиці 3.1 і формул (4.7), (4.10) необхідно розрахувати значення μ_k для заданої операції. Потім в залежності від μ_k і енергонасиченості E трактора вибираємо з таблиці 4.4 відповідне значення поправочного коефіцієнту γ . Далі на підставі формул (4.23) і (2.6) знаходимо коефіцієнт буксування в оптимальному режимі:

$$\delta_{opt} = \gamma \delta_d = \frac{a \varphi_{кр opt}}{b - \varphi_{кр opt}}. \quad (4.24)$$

З врахуванням цієї формули отримаємо оптимальний коефіцієнт використання експлуатаційної ваги трактора:

$$\varphi_{кр opt} = \frac{P_{кр opt}}{mg} = \frac{b \gamma \delta_d}{a + \gamma b \delta_d}. \quad (4.25)$$

Числові значення емпіричних коефіцієнтів a і b вказані в таблиці 2.2.

З рівняння (4.25) знаходимо оптимальну силу тяги трактора

$$P_{кр opt} = mg \frac{b \gamma \delta_d}{a + \gamma b \delta_d}. \quad (4.26)$$

Оптимальну теоретичну швидкість МТА $v_{T opt}$ визначаємо з врахуванням формули (2.13)

$$v_{T opt} = \frac{N_N \varepsilon_N \eta_{тр}}{P_{кр opt} + mg f \cos \alpha}. \quad (4.27)$$

Значення $\varepsilon_N = 0,9$, $\eta_{тр} = 0,88$ і f наведені в завданні 2.

Відповідну робочу швидкість агрегату v_{opt} отримаємо з врахуванням формул (4.24) і (4.27):

$$v_{opt} = v_{т opt}(1 - \delta_d \gamma). \quad (4.28)$$

Потім на підставі виразів (4.7), (4.26) і (4.28) можна визначити оптимальну розрахункову ширину захвату тягового агрегату:

$$B_{p opt} = \frac{P_{кр opt} \varepsilon_{кр} - mgs \sin \alpha}{k_a}, \quad (4.29)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – допустимий коефіцієнт використання тягового зусилля трактора.

З врахуванням отриманого $B_{кр opt}$ слід розрахувати число машин в агрегаті $n_{м opt}$, фактичну ширину захвату $B_{ф opt}$ фронт зчіпки Φ_c .

Спрощений розрахунок ресурсозберігаючого тягового агрегату також завершується визначенням фактичних значень коефіцієнтів використання оптимального тягового зусилля трактора $\varepsilon_{кр.ф}$ і завантаження двигуна $\varepsilon_{Nф}$.

Значення $\varepsilon_{кр.ф}$ отримаємо на підставі формул (4.20) і (4.29):

$$\varepsilon_{кр.ф} = \frac{R_a + mgs \sin \alpha}{P_{кр opt}}. \quad (4.30)$$

Для визначення $\varepsilon_{Nф}$ використаємо рівняння (4.22) при $N_{уд} = 0$:

$$\varepsilon_{Nф} = \frac{R_a v_{opt}}{N_E \eta_T}. \quad (4.31)$$

При $\varepsilon_{кр.ф} < 0,8$ і $\varepsilon_{Nф} < 0,8$ з метою економії паливатакж слід перевірити можливість роботи МТА на більш високій швидкості.

Відмінність між формулами (4.20) і (4.30) обумовлена тим, що величина $mgs \sin \alpha$ в першому випадку врахована в рівнянні (4.12).

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань

Номер варіан та	Технологічна операція	Довжина гону, м	Кут схилу, град	Особливі умови			
				СП	НМ	ПП	A1
1	Посів зернових культур	300...400	0	+	+		
2	Суцільна культивуація	Більше 1000					
3	Лущення стерні	300...400	0				+
4	Боронування (зубове)	Більше 1000	0				
5	Прикочування	300...400	0				
6	Міжрядна культивуація	300...400	0				+
7	Дискування	400...600	2	+			+
8	Посів зернових культур	400...600	1		+		
9	Оранка легких ґрунтів	300...400	0				+
10	Оранка середніх ґрунтів	300...400	0		+		+
11	Оранка важких ґрунтів	300...400	0	+	+		+
12	Міжрядна культивуація	400...600	0				+
13	Суцільна культивуація	400...600	1			+	
14	Лущення стерні	600...1000	2	+	+		+
15	Боронування (зубове)	400...600	1	+		+	
16	Прикочування	600...1000	1				
17	Міжрядна культивуація	400...600	2				+
18	Посів зернових культур	600...1000	0	+			
19	Дискування	Більше 1000	1		+		+
20	Посів зернових культур	600...1000	2				
21	Суцільна культивуація	600...1000	2		+	+	
22	Оранка легких ґрунтів	400...600	2	+			+
23	Оранка середніх ґрунтів	400...600	1		+		+
24	Оранка важких ґрунтів	400...600	0		+		+
25	Суцільна культивуація	Більше 1000	2			+	
26	Боронування (зубове)	Більше 1000	1	+		+	

27	Міжрядна культивування	400...600	0				+
28	Оранка легких ґрунтів	600...1000	3				+
29	Оранка середніх ґрунтів	600...1000	2		+		+
30	Оранка важких ґрунтів	600...1000	1				+

Прийняті позначення:

СП – складні погодні умови; НМ – не хватає механізаторів; ПП – ґрунти переущільнені; А1 – одномашинний агрегат

Знак «+» означає наявність особливої умови.

Примітки. 1. Під посівом зернових культур розуміють вузькорядний посів сівалками типу СЗУ-3,6. 2. На міжрядній культивуванні використовують тільки універсально-просапні трактори.

Зміст завдання

1. Виписати з таблиці 4.5 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Визначити для заданої операції необхідний ресурсозберігаючий діапазон значень потужності і вибрати трактор для відповідних умов роботи.
3. Розрахувати оптимальну енергозберігаючу робочу швидкість агрегату і відповідне тягове зусилля трактора.
4. Розрахувати оптимальну ширину захвату агрегату і визначити відповідне число машин.
5. Розрахувати необхідний фронт зчіпки і вибрати відповідну зчіпку.
6. Визначити фактичне завантаження трактора і двигуна.

Результати розрахунків слід представити у вигляді таблиці 1.4. Записати висновки по кожному пункту завдання.

Практичне заняття №5

Обґрунтування ресурсозберігаючих способів руху машино-тракторних агрегатів

Мета роботи – набуття навичок самостійного вибору ефективних способів руху МТА, що забезпечують в заданих умовах високу якість роботи і найменші втрати ресурсів, пов'язаних з холостим ходом агрегатів. Повинні бути дотримані вимоги безпеки праці і охорони навколишнього середовища.

Загальні відомості.

Після комплектування агрегатів подальше покращення показників ресурсозбереження досягається за рахунок обґрунтування ефективних способів руху МТА, що забезпечують найменші втрати ресурсів на холості ходи.

В завданні склади ресурсозберігаючих агрегатів з метою економії часу задані в залежності від довжини гону L . Для агрегатів по оранці на базі потужних тракторів типу Т-150 і К-701 передбачена також групова робота в складі ланцюгів з оранки, число z яких слід враховувати в розрахунках.

При виборі способу руху і видів поворотів МТА у відповідності з рисунками 5.1 і 5.2 повинні бути дотримані наступні основні вимоги: висока якість виконуваної операції; безпеки праці і охорони навколишнього середовища; найменша довжина холостого шляху при мінімальних втратах часу зміни і ресурсів, що використовуються. Схему вибраного способу руху МТА і стислим аналізом слід представити в звіті по даній роботі. Наприклад, для оранки звичайними плугами прийнятні способи руху всклад і врозгін як окремо, так і з чергуванням, а також безпетльовий комбінований і коловий типу «конверт» (рис.5.1). Перевага чергування способів всклад і врозгін полягає в майже двократному зменшенні числа звальних гребнів і розвальних борозн. При безпетльовому комбінованому способі руху агрегатів з оранки складніше розбивка поля на загони, але менше ширина поворотної стрічки через відсутність петльових поворотів. При способі руху «конверт» менше холостий шлях агрегату, але більші втрати часу зміни, пов'язаною з розбивкою поля на загони. Цей спосіб складніше для практичного застосування.

Недоліки, пов'язані з розбивкою поля на загони, не характерні для оборотних фронтальних плугів при русі човниковим способом. Але цих плугів мало в господарствах, тому в завданні вони не розглянуті.

Операції лушення стерні, дискування, боронування, прикочування можна виконувати наступними способами: човниковим; коловим; врозгін; перекриттям. Коловий спосіб руху більш переважний при невеликій ширині захвату агрегату і малих розмірах полів зі складною конфігурацією. Способи руху врозгін і перекриттям для цих самих операцій ефективні при великій ширині захвату МТА, коли на виконання петльових поворотів потрібно багато часу.

Посівні і посадочні операції при наявності в агрегаті до двох машин доцільно виконувати човниковим способом. Вузькорядний посів насіння зернових культур агрегатом з більш ніж двома сівалками більш переважно виконувати способами руху врозгін або перекриттям. Для суцільної і міжрядної культивування більш ефективні способи руху човниковий (до двох машин в агрегаті) і перекриттям (більше двох машин в агрегаті).

При збиранні картоплі часто використовують безпетльовий комбінований спосіб руху агрегатів на чотирьох рівних частинах загону таким чином, щоб зібрана частина поля знаходилась справа – з боку вивантаження бульб. Для скошування трав більш переважний коловий спосіб, для збирання силосних культур – також коловий або врозгін з вивантаженням подрібненої маси в бік зібраної частини поля. Для силосозбиральних агрегатів, що розглядаються в даному завданні, вивантаження подрібненої маси проходить в лівий бік пр. і русі по ходу годинникової стрілки.

Перспективний напрямок зменшення втрат часу і ресурсів, пов'язаних з холостим ходом агрегатів, – створення в кожному господарстві спеціалізованої служби підготовки полів, витрати на утримання якої окупаються за рахунок підвищення продуктивності основних МТА при більш

високій якості роботи. Обґрунтування методів ефективної роботи такої служби можна виконати як дослідницьку роботу.

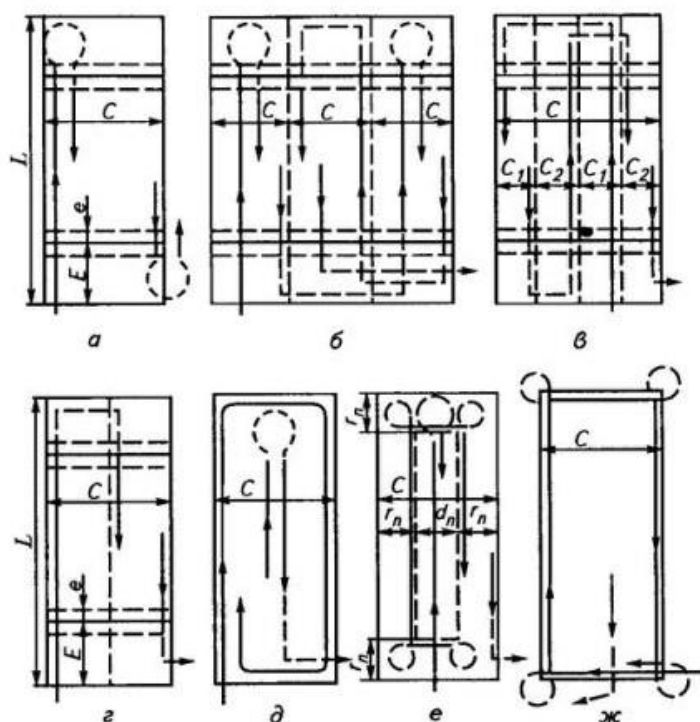


Рисунок 5.1 – Схеми основних способів руху МТА:

а – човниковий; б – чергування всклад, врозгін; в – безпетльовий комбінований; г – перекриттям; д – круговий; е, ж – круговий типу «конверт»

Середній радіус повороту агрегату R (рис. 5.2), довжину виїзду e і ширину поворотної стрічки E можна спрощено визначити з урахуванням наступних міркувань. Радіус повороту залежить від конструктивних особливостей МТА, ширини захвату B і швидкості руху v_x при холостому ході у відповідності з рівнянням

$$R = a_{R0} a_{Rv} = a_R B, \quad (5.1)$$

де a_{R0} – коефіцієнт пропорційності при $v_x = 1,5$ м/с; a_{Rv} – поправочний коефіцієнт при $v_x < 1,5$ м/с; $a_R = a_{R0} a_{Rv}$ – загальний коефіцієнт пропорційності.

Наближені значення a_{R0} і a_{Rv} для основних типів МТА (в тому числі для напівнавісних) вказані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Значення a_{R0} і a_{Rv} для причіпних (П) і навісних (Н) агрегатів

Агрегати	Швидкість руху МТА при холостому ході, м/с							
	1,5		2		2,5		3	
	a _{R0}		a _{Rv}					
	Н	П	Н	П	Н	П	Н	П
Для оранки	3	4,5	1,05	1,15	1,2	1,42	1,35	1,6
Для передпо- сівноїоброб- ки ґрунту	0,9	1,4	1,06	1,25	1,32	1,55	1,46	1,75
Посівні і посадочні (одно-, двохмашинні)	1,1	1,6	1,08	1,32	1,41	1,57	1,58	1,8
Посівні (трьох-,	9	1,2	1,08	1,32	1,41	1,57	1,58	1,8

п'ятимашинні)								
Для міжрядної культивуації	0,8	1,1	1,06	1,35	1,34	1,68	1,48	1,85
Для косіння	0,9	1,2	1,09	1,3	1,346	1,62	1,52	1,82
Для жнив	0,9	1,6	1,09	1,9	1,46	1,62	1,52	1,82

Довжина виїзду е агрегату залежить від його кінематичної довжини l_k . Тому наближено можна прийняти

$$e = a_{e0} l_k, \quad (5.2)$$

де a_{e0} – коефіцієнт пропорційності.

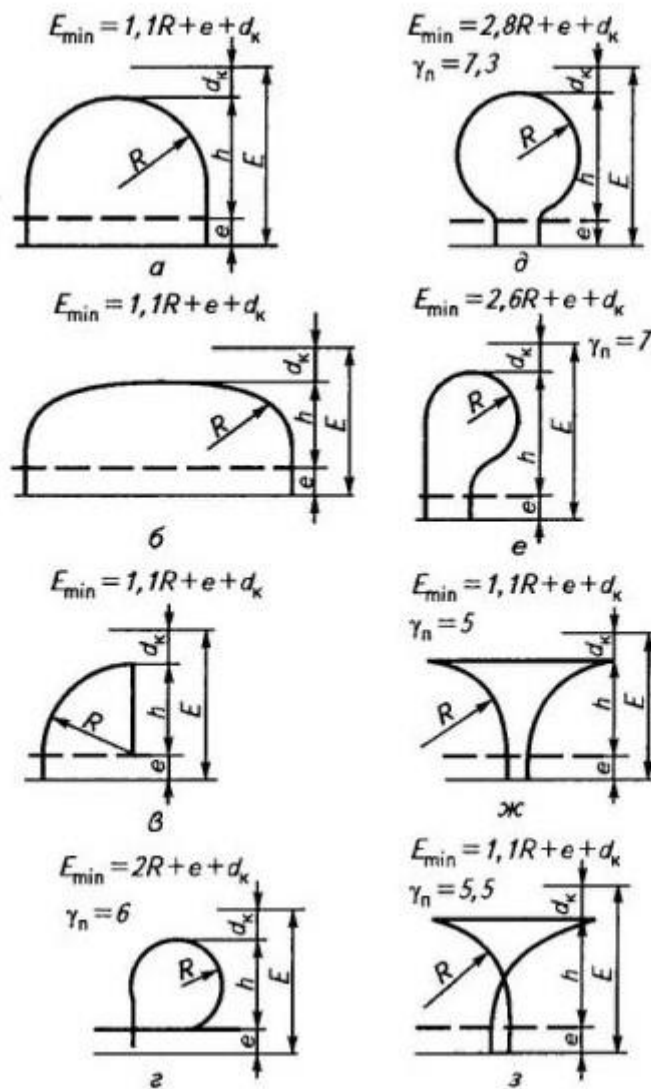


Рисунок 5.2 – Основні види поворотів МТА:

а – безпетльовий на кут 180° ; б – безпетльовий з прямолінійною ділянкою; в – безпетльовий на кут 90° ; г – перехресно-петльовий; д - петльовий грушоподібний; е – петльовий односторонній; ж, з – петльові грибоподібні

Кінематична довжина l_k агрегату, в свою чергу, залежить від ширини В захвату наступним чином:

$$l_k = a_{ek} B, \quad (5.3)$$

де a_{ek} – коефіцієнт пропорційності (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Коефіцієнт a_{ek} для окремих типів агрегатів

Агрегати	Значення a_{ek}
Для оранки	3
Для луцення стерні і дискування	0,97
Для суцільної і міжрядної культивування	1,54
Для боронування	0,69
Для прикочування	0,57
Для посіву насіння зернових культур	1,33
Для посіву і посадки просапних культур	0,65

На підставі формул (5.2) і (5.3) довжина виїзду МТА

$$e = a_{e0} a_{ek} B = a_e B, \quad (5.4)$$

де $a_e = a_{e0} a_{ek}$ – загальний коефіцієнт пропорційності. Наближено можна прийняти: $a_{e0} = 0,6 \dots 0,7$ – для причіпних агрегатів; $a_{e0} = 0,1 \dots 0,2$ – для навісних та напівнавісних агрегатів.

Значення a_{ek} для агрегатів, не врахованих в таблиці 5.2, можна визначити наближено по формулі (5.3):

$$a_{ek} = l_k / B = (l_t + l_c + l_m) / B,$$

де l_t, l_c, l_m – кінематичні довжини відповідно трактора, зчіпки і робочої машини, м.

Значення l_t і l_c для тракторів і зчіпок основних типів наведені в таблиці 5.3. Для деяких сільськогосподарських машин можна прийняти наступні значення l_m : 3 м – для силосозбиральних комбайнів КСС-2,6 і КС-1,8; 4 м – для картоплезбирального комбайну ККУ-2А; 1 м – для жнивварок КС-2,1 і КДП-4.

Таблиця 5.3 – Кінематичні довжини тракторів і зчіпок

Трактор, зчіпка	Кінематична довжина l_t трактора і l_c зчіпки, м
Т-16М, Т-25А	1
Т-40М(АМ)	1,32
МТЗ-80/82	1,2/1,3*
ДТ-75М	2,35/1,55
Т-150, ДТ-175С	2,12/2,55
Т-150К	2,90/2,4
Т-4А	2,45/1,6
К-701	3,35/2,9
СП-11	6,7
СП-16	9,8
СГ-21 (з бородами)	8

*Дані в чисельнику і знаменнику відносяться до тракторів відповідно в складі навісних і причіпних агрегатів

Фактична ширина поворотної стрічки повинна бути не менше допустимого мінімального значення E_{min} з умови здійснення агрегатом безпечного повороту. Крім того, значення E повинно бути кратним одній B або подвійній $2B$ ширині захвату в залежності від типу МТА і умов його роботи. Мінімальна ширина поворотної полоси (рис. 5.2)

$$E_{min} = h + d_k + e = \lambda_E + d_k + e, \quad (5.5)$$

де d_k – кінематична ширина агрегату вліво при правому повороті і вправо при лівому повороті, м; $d_k = \gamma_E B$; λ_E – параметр, що характеризує вид повороту.

Значення h_i можна прийняти пропорційними відповідно радіусу повороту R_i ширині захвату B агрегату. Тоді з врахуванням формул (5.1), (5.4) отримаємо

$$E_{min} = \lambda_E R + \gamma_E B + a_e B = B(\lambda_E a_R + \gamma_E + a_e). \quad (5.6)$$

Коефіцієнти a_R і a_e отримані раніше, а значення λ_E дорівнюють числам при R на рисунку 5.2. Для симетричних агрегатів з виступаючих частин зчіпки і машин можна прийняти $\gamma_E = 0,6$, для асиметричних агрегатів $\gamma_E = 1,2$.

Якщо поворотну полосу планується обробити за непарне число проходів n_n , то відповідне розрахункове число проходів $n_{n,p}$ отримують із співвідношення:

$$n_{n,p} = E_{min} / B. \quad (5.7)$$

Цей результат округлюють до цілого непарного значення по умові:

$$n_n \geq n_{n,p},$$

а потім розраховують необхідну ширину поворотної полоси:

$$E = n_n B. \quad (5.8)$$

Якщо поворотну полосу необхідно обробити за парне число проходів МТА, то значення $n_{n,p}$, отримане по формулі (5.7), необхідно округлити в більшу сторону до найближчого парного числа. Парність або непарність числа проходів МТА при обробці поворотної полоси залежить від напрямку виїзду з поворотної полоси: якщо виїзд агрегату проходить в сторону заїзду, то число проходів повинно бути парним, і навпаки. При цьому враховують і розташування сусіднього загону, на який повинен переїхати агрегат.

Оптимальну ширину загону слід визначити по двом основним критеріям працездатності:

по мінімуму довжини холостого шляху

$$S_x \rightarrow \min; \quad (5.9)$$

по мінімуму втрат часу зміни, пов'язаних з холостим ходом МТА

$$T_x \rightarrow \min. \quad (5.10)$$

Для всіх МТА і способів руху, зображених на рисунку 5.1, довжину холостого ходу агрегату, m , визначають із узагальненого рівняння

$$S_x = \frac{F_n}{L} \left(E_x \frac{C}{B} + A_x \frac{B}{C} + D_x \right), \quad (5.11)$$

де F_n – площа обробленого поля, m^2 ; L – довжина гону, m ; E_x , A_x , D_x – коефіцієнти, що характеризують холостий хід агрегату.

Величини E_x , A_x , D_x характеризують особливості кожного способу руху і прийняті організаційні форми роботи МТА. Значення E_x , A_x , D_x для всіх основних способів руху агрегатів розраховують по формулам (5.20)...(5.34). Ефективність способів руху МТА найбільш повно характеризує критерій оптимальності (5.10), який з врахуванням формули (5.11) буде мати вигляд

$$T_x = \frac{F_n}{L} \left[\frac{1}{v_x} \left(E_x \frac{C}{B} + A_x \frac{B}{C} + D_x \right) + \frac{z T_{вс}}{C} \right] \rightarrow \min, \quad (5.12)$$

де T_x – втрати часу зміни на холостий хід МТА, s ; v_x – швидкість руху агрегату при холостому ході, m/s ; z – число агрегатів, що працюють на одному загоні; $T_{вс}$ – допоміжний час, пов'язаний з холостим ходом МТА в межах одного загону, s .

Якщо кожний агрегат працює на окремому загоні, то у відповідних рівняннях слід прийняти $z = 1$. Такий варіант групової роботи агрегатів найбільш ефективний.

Величина $T_{вс}$ включає в себе наступні складові втрат часу зміни: на розмітку загону; налаштування агрегату для першого проходження і наступне переналаштування на основний режим роботи; підготовку агрегату до переїзду на сусідній загін тощо.

Розрахункову оптимальну ширину $C_{T_{opt}}$ загону згідно критерію (5.12) отримаємо з умови $dT_x/dC = 0$ у вигляді

$$C_{T_{opt}} = B \sqrt{\frac{1}{E_x} \left(A_x + \frac{zT_{вс} v_x}{B} \right)}. \quad (5.13)$$

Розрахункову оптимальну ширину загону по критерію (5.9) з врахуванням формули (5.11) отримаємо з виразу (5.13) у вигляді окремого рішення при $T_{вс} = 0$:

$$C_{S_{opt}} = B \sqrt{\frac{A_x}{E_x}}. \quad (5.14)$$

З виразів (5.13) і (5.14) видно, що критерію оптимальності $T_x \rightarrow \min$ відповідає більше значення оптимальної ширини загону $C_{T_{opt}}$. Такий варіант розрахунку більш повно відображає виробничу ситуацію, оскільки в більшості випадків тракторист сам вимушений займатися розбиванням поля на загоны. Виходячи з цього практичні рекомендації доцільно розробляти на підставі формули (5.14).

Слід відмітити, що необхідні нормативні дані для визначення $T_{вс}$ відсутні. В межах даного завдання для навчальних цілей можна використовувати наступні значення $T_{вс}$: агрегати для оранки - 180 с; агрегати для боронування, лущіння стерні і дискування, суцільної і міжрядної культивування, а також прикочування – 120 с; посівні і посадочні агрегати – 140 с; збиральні агрегати – 120 с.

Дійсна оптимальна ширина загону повинна бути кратною ширині захвату, тому попередньо на підставі формул (5.13) і (5.14) слід визначити розрахункове число подвійних проходів МТА:

$$n_{Tp2} = \frac{C_{Tp\ opt}}{2B}; n_{Sp2} = \frac{C_{Sp\ opt}}{2B}. \quad (5.15)$$

Отримані значення n_{Tp2} і n_{Sp2} слід округлити до цілих чисел подвійних проходів МТА n_{T2} і n_{S2} у відповідності з умовами $n_{T2} \geq n_{Tp2}$, $n_{S2} \geq n_{Sp2}$, після чого можна розрахувати дійсні оптимальні значення ширини загону:

$$C_{T\ opt} = 2Bn_{T2}; C_{S\ opt} = 2Bn_{S2}. \quad (5.16)$$

На цьому завершуються необхідні розрахунки по пункту 4 завдання. При необхідності значення $C_{T\ opt}$ і $C_{S\ opt}$ можна скорегувати з врахуванням виробничих умов з дотриманням кратності їх подвоєної ширини захвату агрегату.

Мінімальне значення довжини холостого ходу S_{x1min} агрегату в розрахунку на 1 га обробленої площі отримаємо з рівняння (5.11) при $F_n = 10^4 \text{ м}^2$ і $C = C_{Sopt}$ в наступному вигляді:

$$S_x = \frac{10^4}{L} \left(E_x \frac{C_{S\ opt}}{B} + A_x \frac{B}{C_{S\ opt}} + D_x \right). \quad (5.17)$$

Значенню C_{x1min} відповідає максимальний коефіцієнт робочих ходів МТА

$$\varphi_{pmax} = \frac{S_p}{S_p + S_{x1min}} = \frac{1}{1 + \frac{B}{L} \left(E_x \frac{C_{Sopt}}{B} + A_x \frac{B}{C_{Sopt}} + D_x \right)}, \quad (5.18)$$

де $S_p = 10^4/B$ - довжина робочого шляху агрегату на га, м.

Аналогічним чином з (5.12) при $C = C_{T\ opt}$ отримаємо мінімальні втрати часу зміни, пов'язані з холостим ходом агрегату:

$$T_{x1min} = \frac{10^4}{L} \left[\frac{1}{v_x} \left(E_x \frac{C_{Topt}}{B} + A_x \frac{B}{C_{Topt}} + D_x \right) + \frac{zT_{вс}}{C_{Topt}} \right]. \quad (5.19)$$

Значення E_x , A_x , D_x для кожного способу руху слід визначати по наведеним нижче формулам.

Для способів руху всклад і врозгін включаючи їх чергування:

$$E_x = 0,5;$$

$$A_x = (2,14a_R + 2a_s)z + 2a_R^2(\gamma_n - 2,14) - (1 + n_{пк})(\gamma_n a_R + 2a_s) + \beta_p m_d \left(\frac{L}{B} + \gamma_n a_R + 2a_s \right) + 2\mu_n (\lambda_E a_R + \gamma_E + a_s)(\gamma_n a_R + 2a_s); \quad (5.20)$$

$$D_x = (\beta_3 - 0,5)z + 1,14a_R + 2a_s, \quad (5.21)$$

де z – число агрегатів на одному загоні; γ_n – коефіцієнт, що характеризує залежність довжини петльового повороту від радіусу (значення $\gamma_n =$ для петльових поворотів агрегату – див. рис. 5.2); $n_{пк}$ – число петльових поворотів, зроблених допоміжним агрегатом на одному загоні: при попередній підготовці полів $n_{пк} = 1$, без попередньої підготовки (як в даному завданні) $n_{пк} = 0$; β_p – число звальних гребнів і розвальних борозн на одному загоні: при їх чергуванні $\beta_p = 1$, без чергування $\beta_p = 2$; m_d – число допоміжних заїздів для зарівнювання однієї розвальної борозни або звального гребня при оранці, для обробки стиків і клинів, що залишилися, при інших видах робіт: для агрегатів з оранки $m_d = 2$, для інших МТА $m_d = 1$; $\mu_n = 1/n_{зп}$ – величина, зворотна числу загонів $n_{зп}$, поворотні полоси яких обробляються сумісно. Так як частіше за все $n_{зп}=1$, то слід прийняти $\mu_n = 1$; β_3 – коефіцієнт, що характеризує частину ширини загону, на яку переміщується агрегат при переїздах з одного загону на інший: в розрахунках можна прийняти усереднене значення $\beta_3 = 1,75$.

При чергуванні способів руху МТА всклад і врозгін на оранці для зменшення довжини шляху або часу холостих переїздів слід обробляти непарні загоны способом всклад в напрямку зліва направо, а парні загоны – способом врозгін в зворотному напрямку. Крім того, можливі і інші окремі випадки роботи агрегатів: $z = 1$ – кожний агрегат групи працює на окремому загоні; $m_d = 0$ – при відсутності додаткових заїздів для зарівнювання борозн, гребнів, стиків і клинів; $\mu_n = 0$ – без обробки поворотних полос.

Значення $m_d = 0$ і $\mu_n = 0$ мають місце в основному при попередній підготовці полів допоміжним агрегатом. При цьому оптимальна ширина загону не залежить від довжини гону, а довжина холостого шляху основних агрегатів і відповідні втрати часу зміни істотно зменшуються. Для практичного застосування такого способу економії ресурсів в кожному господарстві необхідно організувати (як вказано раніше) спеціалізовану службу підготовки полів. Необхідно врахувати також, що рекомендований в деяких літературних джерелах спосіб руху зернозбиральних комбайнів з розширенням прокосів є окремим випадком чергування способів руху всклад і врозгін на трьох загонах з попередньою підготовкою полів при $m_d = 0$ і $\mu_n = 0$.

Для руху безпетльовим комбінованим способом:

$$E_x = 0,5;$$

$$A_x = m_d \beta_p \left(1,14a_R + 2a_s + \frac{L}{B} \right) + 2\mu_n (\lambda_E a_R + \gamma_E + a_s)(\gamma_n a_R + 2a_s); \quad (5.22)$$

$$D_x = 1,14a_R + 2a_s + 0,5m_d \beta_p. \quad (5.23)$$

При необхідності додаткових заїздів для обробки борозн і гребнів (наприклад, при оранці), а також стиків слід прийняти $\beta_p = 2$.

Значення m_d вибирають по аналогії з попередніми способами руху. Випадки $m_d = 0$ і $\mu_n = 0$ аналогічні попередньому способу руху. При цьому з формули (5.22) маємо $A_x = 0$, і відповідно оптимальна ширина загону (див. формулу (5.14)) $C_{Sopt} = 0$. Рациональну ширину загону слід вибирати з практичних міркувань із дотриманням умови здійснення безпетльових поворотів:

$$C \geq C_{min} = 4B(2a_R + z - 1), \quad (5.24)$$

де C_{min} – мінімальна ширина загону, що забезпечує можливість здійснення агрегатом безпетльових поворотів, м.

Одночасно менша частина загону C_{2min} (див. рис. 5.1) також повинна задовольняти умові

$$C_{2min} \geq \frac{1}{4} C_{min}.$$

Наведені умови забезпечення можливості здійснення агрегатом безпетльових поворотів повинні дотримуватися при будь-якому варіанті розрахунку. Якщо ширина загону C , що визначається по формулі (5.13) або (5.24) з врахуванням виразів (5.22) і (5.23) виявиться надто малою і незручною з практичних міркувань, то слід вибрати найближче раціональне значення ширини загону C_p , кратне подвоєній $2B$ ширині захвату агрегату. При цьому число проходів МТА на кожній частині загону повинно бути цілим. Напрямок руху агрегату по загону необхідно вибирати з врахуванням раніше викладених рекомендацій. Наприклад, для збиральних агрегатів зібрана частина загону повинна знаходитися з боку вивантаження врожаю.

Для руху перекриттям:

$$E_x = 0,5;$$

$$A_x = z^2 + 1,14a_R + 2a_s + 2\mu_n(\lambda_E a_R + \gamma_E + a_s)(\gamma_n a_R + 2a_s); \quad (5.25)$$

$$D_x = 1,14a_R + 2a_s + 1. \quad (5.26)$$

В даному випадку частіше за все немає необхідності обробляти борозни і стики, тому у виразах (5.25) і (5.26) слід прийняти $m_d = 0$ (в інших випадках $m_d = 1$). Якщо при цьому не обробляються поворотні полоси, то слід прийняти $\mu_n = 0$. По аналогії з попереднім випадком повинна бути забезпечена можливість здійснення агрегатом безпетльових поворотів, тобто повинна бути дотримана умова:

$$C \geq C_{min} = 2(2a_R + z)B. \quad (5.27)$$

Наступне рішення, включаючи вибір раціональної ширини загону, виконують аналогічно попередньому випадку.

Для руху круговим способом:

$$E_x = 0;$$

$$A_x = (\gamma_n a_R + 2a_s)(2a_R - 1) + z(1,14a_R + 2a_s) + m_d \left(\frac{L}{B} + \gamma_n a_R + 2a_s \right) - 2\pi a_R^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_6} - 1 \right); \quad (5.28)$$

$$D_x = \beta_3 z + \left(\frac{1}{\varepsilon_6} - 1 \right) \pi a_R. \quad (5.29)$$

де $\varepsilon_6 = v_n/v$: наближено $\varepsilon_6 = 0,8$; v_n, v – швидкості руху МТА відповідно при повороті і прямолінійному русі, м/с.

В даному випадку холості повороти виконують в середині загону. Крім того, виникає втрата шляху при робочих поворотах агрегату (скритий холостий хід). Рівняння (5.28) і (5.29) справедливі як для руху МТА від периферії до центру, так і навпаки. Для збереження мікрофлори ґрунту на оброблюваній ділянці більш переважний рух агрегатів від центру до периферії. Але для цього необхідна попередня підготовка поля, зокрема для збиральних робіт.

Коефіцієнт β_3 на відміну від виразу (5.21) слід прийняти рівним 0,5. Необхідність в додаткових заїздах для обробки стиків може виникнути при русі від периферії до центру, тому $m_d = 2$ при виїзді з загону в бік в'їзду і $m_d = 1$ при виїзді в протилежний бік.

В даному випадку $E_x = 0$, тому у відповідності з формулами (5.13) і (5.14) оптимальна ширина загону $C_{opt} \rightarrow \infty$. Раціональну ширину загону C_p при цьому вибирають з практичних міркувань по принципу «чим більше, тим краще». По організаційним міркуванням обробка загону повинна бути закінчена в межах робочого дня. Відповідно площа загону повинна чисельно дорівнювати денній продуктивності агрегату.

Для руху круговим способом типу «конверт»:

$$E_x = 0;$$

$$A_x = (2a_R - 1)(\gamma_n a_R + 2a_s) + (\rho_n - 2a_R)(0,5\rho_n + 2,14a_R + 2a_s - 0,5z) - 2\rho_n(\gamma_n a_R + 2a_s) + m_d \left(\frac{L}{B} + \rho_n + \gamma_n a_R + 2a_s \right) + z(1,14a_R + 2a_s) \quad (5.30)$$

$$D_x = 2(\gamma_n a_R + 2a_s) + z\beta_3 - m_d, \quad (5.31)$$

де $\rho_n = d_n/B$ – число проходів агрегату; d_n – частина загону, м; інші позначення аналогічні попереднім випадкам.

Найменше можливе значення d_{Π} наближено можна визначити з рівняння $d_{\Pi \min} = 2R + 2e = 2B(a_R + a_e)$.

Відповідно отримаємо

$$\rho_{\Pi} \geq \rho_{\Pi \min} = \frac{d_{\Pi \min}}{B} = 2(a_R + a_e). \quad (5.32)$$

В залежності від напрямку руху МТА прийняти: $\beta_3 = 0,5$ – переїзд на сусідній правий загін при русі агрегату від центру до периферії, і навпаки, на сусідній лівий загін при русі від периферії до центру; $\beta_3 = 1,5$ переїзд на сусідній лівий загін при русі від центру до периферії, і навпаки, на сусідній правий загін при русі від периферії до центру.

Необхідність в додаткових заїздах і відповідне значення m_d слід визначити по аналогії з попередніми випадками. Розміри загону з врахуванням $E_x = 0$ також визначають по аналогії з попереднім випадком. На підставі виразів (5.30), (5.31) і (5.32) можна розрахувати всі необхідні показники холостого ходу МТА для даного способу руху.

Для човникового способу руху:

$$E_x = 0; \quad A_x = 2\mu_{\Pi}(\lambda_E a_R + \gamma_E + a_e)(\gamma_{\Pi} a_R + 2a_e); \quad (5.33)$$

$$D_x = \gamma_{\Pi} a_R + 2a_e. \quad (5.34)$$

В даному випадку руху оптимальна ширина загону також $C_{opt} \rightarrow \infty$, тому по аналогії з круговим способом руху слід вибрати раціональне значення C_p з врахуванням денної продуктивності агрегату.

Якщо загін обробляють в двох взаємно перпендикулярних напрямках, то праву частину рівняння (5.11) з врахуванням виразів (5.33), (5.34) слід подвоювати.

Таблиця 5.4 – Варіанти завдань

Номер варіанту	Операція	L, м	Склад агрегату (вид агрегату)	B, м	v_x , м/с	z
1	Оранка легких грунтів	400	МТЗ-80+ПЛН-3-35 (Н)	1,05	2,5	1
2	Оранка середніх грунтів	600	ДТ-75М+ПЛН-4-35 (Н)	1,4	2,5	1
3	Оранка важких грунтів	700	Т-150+ПЛН-5-35 (Н)	1,75	2,5	3 (ПО)
4	Боронування	1000	ДТ-75М+СГ-21+ +20БЗСС-1 (П)	20	1,5	1
5	Лущення стерні	400	МТЗ-82+ЛДГ-5А (П)	5	2,5	1
6	Дискування	600	ДТ-75М+ЛДГ-10А (П)	10	2	1
7	Суцільна культивация	600	Т-150К+СП-11+2КПС-4 (П)	8	2	1
8	Прикочування	400	ЮМЗ-6АКЛ+СП-11+ +2 – ЗККШ-6 (П)	12,2	2	1
9	Посів зернових культур	600	МТЗ-80+СЗУ-3,6 (П)	3,6	2,5	1
10	Посадка картоплі	400	МТЗ-82+СН-4Б (Н)	2,8	2	1
11	Міжрядна культивация	400	МТЗ-80+КРН-4,2 (Н)	4,2	2,5	1
12	Збирання картоплі	600	ДТ-75М+ККУ-2А (П)	1,4	1,5	1
13	Збирання силосних культур	600	МТЗ-82+КС-1,8 (П)	1,8	2	1
14	Косіння трав	600	ЮМЗ-6АКЛ+КС-2,1 (Н)	2,1	2,5	1
15	Оранка легких	800	Т-150+ПНИ-5-40 (Н)	2,1	2,5	2

	ґрунтів					
16	Оранка середніх ґрунтів	1000	К-701+ПП-8-40 (ПН)	3,2	2,5	3 (ПО)
17	Оранка важких ґрунтів	600	Т-150+ППИ-6-ПО (ПН)	1,8	2,5	3 (ПО)
18	Боронування	600	МТЗ-80+СП-11+12БЗСС-1	12	2	1
19	Лущення стерні	1000	Т-150К+ЛДГ-15А (П)	15	2	1
20	Дискування	800	К-701+ЛДГ-20 (П)	20	2	1
21	Суцільна культивування	900	К-701+СП-16+4КПС-4 (П)	16	2	1
22	Прикочування	800	МТЗ-80+СП-11+2-3ККШ-6 (П)	12,2	2	1
23	Оранка середніх ґрунтів	800	ДТ-175С+ППИ-6-40 (ПН)	2	2	3
24	Посадка картоплі	600	ДТ-75М+СКМ-6 (ПН)	4,2	2	1
25	Міжрядна культивування	600	МТЗ-80+КРН-5,6 (Н)	5,6	2,5	1
26	Збирання картоплі	400	МТЗ-82+ККУ-2А (П)	1,4	1,5	1
27	Збирання силосних культур	600	МТЗ-80+КСС-2,6 (П)	2,6	2	1
28	Косіння трав	600	ЮМЗ-6АКЛ+КДП-4 (Н)	4	2,5	1
29	Оранка середніх ґрунтів	800	К-701+ПНИ-8-40 (Н)	3,15	2,5	3 (ПО)
30	Посів зернових культур	800	ДТ-75М+СП-11+3СЗУ-3,6 (П)	10,8	2	1

Прийняті позначення: L – довжина гону; B – ширина захвату агрегату; v_x – швидкість руху при холостому ході МТА; z – число агрегатів при груповій роботі; Н – навісний агрегат; ПН – напівнавісний агрегат; П – причіпний агрегат; ПО – в обробці поворотних полос потреби немає.

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 5.4 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Вибрати для заданої операції і відповідного МТА ефективний спосіб руху і видів поворотів, що забезпечують високу якість роботи при найменших втратах, пов'язаних з холостим ходом.
3. Визначити середній радіус повороту R і довжину виїзду е агрегату, а також раціональну ширину поворотної полоси E.
4. Розрахувати оптимальну ширину загону, що забезпечує мінімальну довжину холостого шляху агрегату S_{Lopt} , і втрати часу зміни $S_{T opt}$.
5. Визначити при оптимальній ширині загону мінімальні довжину холостого шляху агрегату S_{x1min} і втрати часу зміни T_{x1min} в розрахунку на 1 га обробленої площі, а також максимальний коефіцієнт робочих ходів ϕ_{pmax} .
6. Результати розрахунків для зручності оперативного аналізу представити у вигляді таблиці 1.4.

Практичне заняття №6

Визначення продуктивності машинно-тракторного агрегату

Мета роботи – опанувати сучасні методи розрахунку продуктивності МТА з врахуванням впливу основних параметрів і природно-виробничих факторів.

Загальні відомості.

Продуктивність МТА дорівнює об'єму виконаної ним роботи необхідної якості за визначений проміжок часу. В залежності від прийнятого проміжку часу розрізняють секундну, годинну, змінну і денну продуктивності МТА. Помножуючи денну продуктивність на відповідне число днів, можна отримати продуктивність МТА за будь-який інший проміжок часу.

Продуктивність є одним з найважливіших техніко-економічних показників будь-якого агрегату, на підставі якої проводять нормування і планування сільськогосподарських робіт з врахуванням агротехнічних термінів їх виконання, а також розраховують відповідні витрати, включаючи заробітну плату механізаторам і допоміжним робітникам. Виходячи з цього від правильності визначення продуктивності МТА в значному ступеню залежить ефективність всього сільськогосподарського виробництва. Особлива складність і актуальність задачі, що розглядається, полягає в тому, що кожна технологічна операція, пов'язана з виробництвом сільськогосподарської продукції, повинна бути виконана у встановлені агротехнічні терміни, відхилення від яких приводить до значних втрат врожаю.

Раніше виконані завдання є частиною загальної проблеми забезпечення високопродуктивної роботи агрегатів при найменшій витраті ресурсів. Але крім раніше розглянутих параметрів і режимів роботи тракторів і сільськогосподарських машин на продуктивність МТА впливає багато інших параметрів самого агрегату та зовнішніх факторів.

Продуктивність МТА при нормуванні польових механізованих робіт визначають для типових умов і для кожного класу довжини гону: менше 150 м; 150...200 м; 200...300 м; 300...400 м; 400...600 м; 600...1000 м; більше 1000 м. Типові умови роботи МТА: поля правильної конфігурації (прямокутної форми); рельєф рівний (кут схилу $\alpha \leq 1^\circ$); висота над рівнем моря до 500 м; каменістість і перепони відсутні; ґрунти з середньою міцністю несучої поверхні і вологістю до 22%.

Відхилення умов роботи МТА від вказаних типових при розрахунку його продуктивності враховують узагальненим поправочним коефіцієнтом $k_{об}$, який визначається у вигляді добутку

$$k_{об} = k_k k_h k_c k_p k_r, \quad (6.1)$$

де k_k, k_h, k_c, k_p, k_r - окремі поправочні коефіцієнти відповідно на каменістість, висоту над рівнем моря, складність конфігурації полів, зрізаність полів перепонами і на рельєф.

Значення коефіцієнтів k_k, k_h, k_c, k_p, k_r надані в таблицях (6.1)...(6.4).

Таблиця 6.1 – Поправочний коефіцієнт на каменістість

Види робіт	Значення k_k при каменістісті			
	нульовий	Слабкий	середній	сильний
Оранка	1	0,98	0,92	0,85
Роботи, не пов'язані з оранкою	1	0,99	0,93	0,82
Косіння трав	1	0,90	0,85	-

Таблиця 6.2 – Поправочний коефіцієнт на висоту над рівнем моря

Висота над рівнем моря, м	Значення k_h при довжині гону і видах робіт					
	менше 200 м		200...600 м		більше 600 м	
	оранка	інші	оранка	інші	оранка	інші
До 500	1	1	1	1	1	1

500...1000	0,95	0,98	0,94	0,97	0,93	0,96
1000...1500	0,91	0,96	0,89	0,95	0,80	0,94
1500...2000	0,88	0,94	0,85	0,93	0,82	0,92

Таблиця 6.3 – Поправочний коефіцієнт на складність конфігурації полів

Група контуру поля	Значення $k_{сп}$ при довжині гону і видах робіт									
	менше 200 м		200...400 м		400...600 м		600...1000 м		більше 1000 м	
	О	І	О	І	О	І	О	І	О	І
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
II	0,97	0,96	0,98	0,97	0,99	0,98	1	1	1	1
III	0,91	0,92	0,95	0,94	0,97	0,96	1	1	1	1
IV	0,81	0,83	0,87	0,89	0,93	0,95	1	1	1	1
V	0,75	0,79	0,84	0,86	0,88	0,92	0,96	0,98	1	1

Позначення: О – оранка, І – інші види робіт

Таблиця 6.4 – Поправочний коефіцієнт на зрізаність полів перепонами

Види робіт	Значення k_n на площі, яка зайнята перепонами, %							
	0	до 5	5...10	10...15	15...20	20...25	25...30	30...35
Оранка	1	0,96	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74
Інші	1	0,96	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77

Поправочний коефіцієнт на рельєф k_p має наступні значення: 1 – при $\alpha \leq 1^\circ$; 0,97 – на оранку; 0,95 – на інші роботи при $\alpha = 1...3^\circ$. Підставивши наведені значення окремих коефіцієнтів в формулу (6.1), можна розрахувати узагальнений поправочний коефіцієнт $k_{об}$.

Коефіцієнт використання часу зміни МТА

$$\tau = \frac{T_p}{T_{зм}}, \quad (6.2)$$

де T_p – час основної (чистої) роботи МТА за зміну; $T_{зм}$ – тривалість зміни: при нормуванні механізованих робіт приймають $T_{зм} = 7$ год.

Складові балансу часу зміни у відповідності з методами нормування польових механізованих робіт можна розділити на чотири групи:

$$T_{зм} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (6.3)$$

де T_1, T_2, T_3, T_4 – групи складових балансу часу (для зручності наступних висновків час визначають в секундах).

В першу групу T_1 входять постійні складові балансу часу зміни, включаючи час отримання наряду, час відпочинку тощо. Друга група складових T_2 залежить від параметрів МТА, але мало залежить від фактичного об'єму виконаної роботи; час щозмінного технічного обслуговування (ЩТО) агрегату; загальний час переїзду до місця роботи тощо. Параметри МТА комплексно характеризуються його чистою продуктивністю Π (продуктивністю за одиницю основного часу), яку можна розглядати в якості узагальненого параметру агрегату. Тоді величину T_2 можна визначити по формулі:

$$T_2 = a_2 + b_2 \Pi, \quad (6.4)$$

де Π – чиста продуктивність агрегату, m^2/c ; a_2, b_2 – коефіцієнти, що визначаються по статистичним даним.

Для першої групи постійних складових також можна прийняти

$$T_1 = T_{\Pi} = \text{const}. \quad (6.5)$$

В третю групу складових входять тривалості холостих поворотів, технологічного обслуговування, усунення відмов і інші, що залежать від фактичного об'єму виконаної роботи. Тому можна записати

$$T_{\Sigma} = k_w W_{\Sigma} = k_w B v T_p, \quad (6.6)$$

де W_{Σ} – змінна продуктивність агрегату, га; k_w – коефіцієнт пропорційності; B – ширина захвату, м; v – робоча швидкість, м/с.

Скориставшись рівнянням

$$\Pi = B v, \quad (6.7)$$

отримаємо по аналогії з виразом (6.4)

$$T_{\Sigma} = k_w \Pi T_p. \quad (6.8)$$

Четверту групу складових складає час основний, або чистий, роботи МТА за зміну, тобто

$$T_4 = T_p. \quad (6.9)$$

На підставі формул (6.3)...(6.9) можна записати

$$T_{\Sigma} = T_{\Pi} + a_2 + b_2 \Pi + k_w \Pi T_p + T_p. \quad (6.10)$$

Після ділення обох частин рівняння (6.10) на T_{Σ} з врахуванням формули (6.2) отримаємо коефіцієнт використання часу зміни τ для звичайних агрегатів, продуктивність яких визначають по обробленій площі:

$$\tau = \frac{h_w - a_w \Pi}{1 + k_w \Pi}, \quad (6.11)$$

де h_w , a_w , k_w – емпіричні коефіцієнти:

$$h_w = 1 - \frac{T_p + a_2}{T_{\Sigma}}; \quad a_w = \frac{b_2}{T_{\Sigma}}.$$

Чиста продуктивність збиральних агрегатів відповідає секундній подачі оброблюваного врожаю:

$$\Pi_u = B v u,$$

де u – врожайність, кг/м².

Для збиральних агрегатів значення Π_u в порівнянні з Π повніше відображає фактичний об'єм виконаної роботи, тому відповідне значення коефіцієнту використання часу зміни доцільно визначати за формулою:

$$\tau_u = \frac{h_w - a_w \Pi_u}{1 + k_w \Pi_u}. \quad (6.12)$$

Використовуючи вихідні дані таблиці 6.5, знаходимо по формулі (6.11) значення τ для звичайних агрегатів, а по формулі (6.12) – значення τ_u для збиральних агрегатів.

Годинні продуктивності W (га/год) звичайного агрегату і W_u (т/год) збиральних агрегатів розраховуємо по формулам:

$$W = 0,36 k_{об} \Pi \tau = 0,36 k_{об} \left(\frac{h_w \Pi - a_w \Pi^2}{1 + k_w \Pi} \right); \quad (6.13)$$

$$W_u = 3,6 k_{об} \Pi_u \tau_u = 3,6 k_{об} \left(\frac{h_w \Pi_u - a_w \Pi_u^2}{1 + k_w \Pi_u} \right). \quad (6.14)$$

Продуктивність збиральних агрегатів в гектарах зібраної площі (га/год)

$$W_{uF} = 0,1 \frac{W_u}{u}. \quad (6.15)$$

Значення врожайності u (кг/м²) слід прийняти з таблиці 6.5.

Способи збільшення продуктивності МТА можна бачити з формул (6.13) і (6.14):

збільшення узагальненого поправочного коефіцієнта $k_{об}$ за рахунок покращення стану полів, включаючи вирівнювання, видалення перепон, культуртехнічні та інші заходи;

збільшення ширини захвату B і робочої швидкості v агрегату в результаті створення більш потужних тракторів та самохідних машин;

збільшення h_w , зменшення a_w і k_w за рахунок скорочення непродуктивних втрат часу зміни при підвищенні рівня організації праці і покращенні системи технічного обслуговування.

Найбільш ефективними при швидкій компенсації витрачених засобів є ті способи підвищення продуктивності МТА, які можуть бути реалізовані безпосередньо в самому господарстві, включаючи покращення стану полів і впровадження нових прогресивних форм організації праці. Найбільш тривалий дорогий напрямок збільшення продуктивності МТА – створення нових більш потужних тракторів і самохідних машин з врахуванням природно-виробничих умов. Таку задачу можна вирішувати тільки в державному масштабі в результаті створення ресурсозберігаючого типорозмірного ряду тракторів і самохідних машин з врахуванням всіх зональних умов і наявності необхідного комплексу робочих машин, адаптованих до місцевих ландшафтів.

Таблиця 6.5 – Варіанти завдань

Номер варіанту	Технологічна операція	Склад агрегату	Довжина гону, м
1	Оранка легких ґрунтів	МТЗ-80+ПЛН-3-35	300...400
2	Оранка середніх ґрунтів	Т-150+ПЛН-6-35	400...600
3	Оранка важких ґрунтів	К-700А+ПЛН-8-35	600...1000
4	Боронування	ДТ-75М+СГ-21+ +20БЗСС-1	Більше 1000
5	Лущення стерні	ДТ-75М+ЛДГ-10А	300...400
6	Дискування	Т-150+ЛДГ-15А	400...600
7	Суцільна культивування	Т-150К+СП-11+2КПС-4	400...600
8	Прикочування	ЮМЗ-6АКЛ+СП-11+ +2 – 3ККШ-6	300...400
9	Посів зернових культур	ДТ-75М+СП-11+2КПС-4	400...600
10	Посадка картоплі	МТЗ-80+СН-4Б	300...400
11	Міжрядна культивування	ЮМЗ-6АКЛ+КРН-4,2	300...400
12	Збирання картоплі	МТЗ-80+СН-4Б	300...400
13	Збирання силосних культур	МТЗ-80+КС-1,8	400...600
14	Косіння трав	ЮМЗ-6АКЛ+КС-2,1	400...600
15	Оранка легких ґрунтів	ДТ-75М+ПЛН-5-35	600...1000
16	Оранка середніх ґрунтів	К-701+ПТК-9-35	Більше 1000
17	Оранка важких ґрунтів	Т-4А+ПЛП-6-35	400...600
18	Боронування	ЮМЗ-6АКЛ+СП-11+12БЗСС-1	400...600
19	Лущення стерні	К-700А+ЛДГ-20	600...1000
20	Дискування	К-701+ЛДГ-20	Більше 1000
21	Суцільна культивування	К-701+СП-16+4КПС-4	Більше 1000
22	Прикочування	ДТ-75М+СП-16+3-3ККШ-6	600...1000
23	Посів зернових	МТЗ-80+СЗУ-3,6	300...400
24	Посадка картоплі	ДТ-75М+СКС-4	400...600
25	Міжрядна культивування	МТЗ-80+КРН-5,6	400...600
26	Збирання картоплі	ДТ-75М+ККУ-2А	400...600
27	Збирання силосних культур	Т-150К+КСС-2,6	400...600
28	Косіння трав	МТЗ-80+КДП-4	400...600
29	Оранка середніх ґрунтів	Т-150К+ПЛП-6-35	600...1000
30	Посів зернових культур	Т-150+СП-16+4СЗУ-3,6	600...1000

Продовження таблиці 6.5 по горизонталі

Номер варіанта	Врожайність u , кг/м ²	Кут схилу α , град	Швидкість v , м/с	Ширина захвату B , м	Каменістість	Висота над рівнем моря, м	Група контуру поля	Площа, що зайнята перепонами, %
1	-	0	3,13	1,05	Відсутня	До 500	II	5...10
2	-	2	2,61	2,10	Слабка	До 500	III	10...15
3	-	0	2,14	2,80	Середня	До 500	II	5...10
4	-	3	2,08	19,95	Слабка	До 500	I	0
5	-	2	2,14	10,00	Середня	До 500	II	5...10
6	-	0	2,3	15,00	Відсутня	До 500	III	10...15
7	-	3	3,18	8,00	Відсутня	До 500	II	5...10
8	-	2	2,07	12,20	Слабка	До 500	III	10...15
9	-	1	1,84	10,80	Відсутня	До 500	II	3...4
10	-	0	1,77	2,80	Відсутня	До 500	II	5...10
11	-	1	2,08	4,20	Слабка	До 500	II	5...10
12	2	0	1,1	1,40	Відсутня	До 500	I	0
13	2	2	1,94	1,80	Слабка	До 500	I	2...3
14	0,4	2	2,14	2,10	Відсутня	До 500	II	10...15
15	-	1	2,36	1,75	Середня	600	I	0
16	-	0	2,58	3,15	Відсутня	600	II	1...3
17	-	1	1,94	2,10	Відсутня	600	III	10...15
18	-	2	2,08	11,40	Слабка	600	II	5...10
19	-	0	2,13	20,00	Відсутня	650	I	0
20	-	1	2,90	20,00	Слабка	700	I	0
21	-	1	2,90	16,00	Середня	650	I	0
22	-	0	2,08	18,30	Відсутня	700	II	5...10
23	-	0	3,08	3,60	Слабка	600	III	10...15
24	-	1	2,36	2,80	Середня	650	I	3...4
25	-	2	2,08	5,60	Відсутня	700	I	0
26	1,6	2	1,1	1,40	Слабка	600	II	5...10
27	2,5	2	2	2,60	Середня	620	II	5...10
28	0,3	0	2	4,00	Слабка	630	III	10...15
29	-	1	2,44	2,10	Середня	600	I	2...3
30	-	2	2,27	14,40	Середня	650	I	0

Продовження таблиці 6.5 по горизонталі

Номер варіанту	h_w	a_w	k_w	γ_0	Чисельність механізаторів $m_{\text{мех}}$	Тарифний розряд
1	0,945	0,0105	0,0358	0,805	1	4
2	0,98	0,00754	0,0343	0,819	1	6
3	0,99	0,00615	0,0269	0,852	1	6
4	0,94	0,00320	0,001	0,811	1	4
5	0,73	0,00043	0,00942	0,764	1	4
6	0,75	0,00038	0,0064	0,778	1	5

7	0,815	0,00265	0,00746	0,747	1	5
8	0,81	0,00449	0,00417	0,71	1	2
9	0,68	0,00564	0,00414	0,593	1+2C	4
10	0,41	0,014	0,0587	0,433	1+2C	5
11	0,76	0,00759	0,00244	0,792	1	5
12	0,79	0,0178	0,217	0,62	1+1K+4ДР	5
13	0,74	0,00161	0,0302	0,531	1	5
14	0,7	0,00451	0,0363	0,502	1	4
15	0,99	0,00615	0,0269	0,852	1	5
16	0,995	0,00698	0,0121	0,861	1	6
17	0,98	0,00754	0,0343	0,819	1	6
18	0,88	0,00544	0,00112	0,745	1	3
19	0,81	0,00032	0,00504	0,804	1	5
20	0,82	0,00029	0,00295	0,831	1	5
21	0,85	0,00274	0,00138	0,815	1	5
22	0,895	0,0027	0,00268	0,799	1	3
23	0,65	0,00562	0,00591	0,585	1	3
24	0,43	0,0128	0,0659	0,435	1+2C	5
25	0,8	0,00692	0,00138	0,819	1	5
26	0,79	0,0178	0,217	0,62	1+1K+4ДР	5
27	0,74	0,00161	0,0302	0,531	1	5
28	0,7	0,00451	0,0363	0,502	1	4
29	0,99	0,00615	0,0269	0,852	1	6
30	0,71	0,0049	0,00472	0,607	1+2C	5

Примітки. 1. Новітні марки тракторів і сільськогосподарських машин не використані через відсутність даних, необхідних для розрахунків.

2. Для конкретних місцевих умов при необхідності можна використовувати значення інших діючих факторів.

3. Дані останніх трьох граф відносяться до завдання 7. Прийняті позначення в передостанній графі: К – комбайнер; С – сіяльник або саджальник; ДР – допоміжні робітники; перша цифра – число трактористів.

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 6.5 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Визначити узагальнений поправочний коефіцієнт $k_{об}$ при роботі МТА в заданих умовах.
3. Розрахувати коефіцієнт використання часу зміни τ для заданого МТА.
4. Обчислити продуктивність W заданого МТА.
5. Намітити ефективні ресурсозберігаючі способи збільшення продуктивності МТА.

Результати розрахунків і висновків по всім пунктам завдання представити у вигляді таблиці 1.4.

Практичне заняття №7

Визначення експлуатаційних витрат при роботі машинно-тракторних агрегатів

Мета роботи – опанувати сучасні методи розрахунку експлуатаційних витрат і визначити способи їх зменшення.

Загальні відомості.

В умовах ринкової економіки найважливішою умовою ефективної роботи кожного господарства є отримання найбільшого прибутку. При цьому кожна робота з використанням МТА повинна бути виконана з найменшою витратою використовуваних ресурсів, включаючи трудові, матеріальні і фінансові. Отже, необхідно вміти розраховувати експлуатаційні витрати, пов'язані з роботою МТА, і обґрунтовувати способи їх зменшення.

Оскільки робота виконується стосовно до завдання 6, то з таблиці 6.5 слід виписати тільки вихідні дані, яких не вистачає (γ_0 ; $m_{\text{мех}}$; тарифний розряд), а також використати розраховані в завданні 6 значення годинної продуктивності $W_{\text{або}} W_u$ [див. формули (6.13), (6.14)]

Витрати праці при роботі звичайних і збиральних агрегатів можна розрахувати за формулами

$$H = m_{\text{мех}} / W; \quad (7.1)$$

$$H_u = m_{\text{мех}} / W_u, \quad (7.2)$$

де H – витрати праці для звичайних МТА, люд-год/га; H_u – витрати праці для збиральних агрегатів, люд-год/т; $m_{\text{мех}}$ – чисельність механізаторів, сівальників, комбайнерів і допоміжних робітників.

Витрати праці для збиральних агрегатів в розрахунку на 1 га обробленої площі, люд-год/га,

$$H_{\text{уF}} = \frac{u m_{\text{мех}}}{W_{\text{уF}}} = \frac{u m_{\text{мех}}}{0,1 W_u}, \quad (7.3)$$

де $W_{\text{уF}}$ – значення продуктивності, розраховане по формулі (6.15).

Питома витрата палива на одиницю виконаної агрегатом роботи, кг/га,

$$\theta = \frac{1}{W_{\text{зм}}} (G_{\text{т.р}} T_{\text{р}} + G_{\text{т.х}} T_{\text{х}} + G_{\text{т.о}} T_{\text{о}}), \quad (7.4)$$

де $W_{\text{зм}}$ – змінна продуктивність агрегату, га; $G_{\text{т.р}}$, $G_{\text{т.х}}$, $G_{\text{т.о}}$ – годинна витрата палива двигуном відповідно при робочому і холостому ходах агрегату, а також при зупиненому агрегаті, кг/год; $T_{\text{р}}$, $T_{\text{х}}$, $T_{\text{о}}$ – тривалість роботи двигуна на вказаних режимах, год.

Визначення θ безпосередньо по формулі (7.4) ускладнене через відсутність відповідних вихідних даних, тому нижче викладена методика спрощеного розрахунку. З цією метою рівняння (7.4) необхідно представити в наступному вигляді:

$$\frac{\theta W_{\text{зм}}}{G_{\text{т.р}} T_{\text{зм}}} = \frac{\theta W}{G_{\text{т.р}}} = \tau \left(1 + \frac{G_{\text{т.х}} T_{\text{х}} + G_{\text{т.о}} T_{\text{о}}}{G_{\text{т.р}}} \right), \quad (7.5)$$

де τ – коефіцієнт використання часу зміни.

Як слідує з раніше виконаних завдань, із збільшенням ширини захвату агрегату і робочої швидкості значення τ зменшується, а вираз в дужках в правій частині рівняння (7.5) збільшується. Входячи з цього наближено можна прийняти

$$\tau \left(1 + \frac{G_{\text{т.х}} T_{\text{х}} + G_{\text{т.о}} T_{\text{о}}}{G_{\text{т.р}}} \right) = \gamma_0 = \text{const.}$$

Тоді значення γ_0 можна визначити на підставі нормативних даних для кожного класу довжини гону (див. табл. 6.5).

Питому витрату палива θ можна виразити в функції потужності двигуна:

$$\theta = \frac{G_{т.р}}{W} \gamma_0 = \frac{N_H \varepsilon_N g_e \gamma_0}{10^3 W}, \quad (7.6)$$

де N_H – номінальна ефективна потужність двигуна відповідного трактора, кВт; ε_N – коефіцієнт завантаження двигуна; g_e – питома витрата палива двигуном, г/(кВт·год).

Для збиральних агрегатів необхідно визначити питому витрату палива в розрахунку на 1 т зібраного врожаю

$$\theta_u = \frac{N_H \varepsilon_N g_e \gamma_0}{10^3 W_u}, \quad (7.7)$$

в розрахунку на 1 га

$$\theta_{u\Gamma} = 10u\theta_u. \quad (7.8)$$

В формулах (7.6)...(7.8) можна прийняти усереднені значення $\varepsilon_N = 0,9$; $g_e = 256$ г/(кВт·год), а значення N_H вибрати з таблиці 7.1.

Для визначення витрати палива в літрах на гектар (л/га) або в літрах на тонну (л/т) слід праві частини рівнянь (7.6)...(7.8) розділити на середню густину дизельного палива 0,825 кг/л.

Прямі експлуатаційні витрати для звичайних і збиральних МТА розраховують відповідно по формулам:

$$C_e = C_\theta + C_z + C_{з.р}; \quad (7.9)$$

$$C_{eu} = C_{\theta u} + C_{zu} + C_{з.ру}; \quad (7.10)$$

$$C_{euF} = 10u C_{eu}, \quad (7.11)$$

де C_e , C_{eu} , C_{euF} – прямі витрати відповідно грн/га, грн/т, грн/га; C_θ , $C_{\theta u}$ – відповідні витрати на паливо, грн/га, грн/т; C_z , C_{zu} – витрати на заробітну плату, грн/га, грн/т; $C_{з.р}$, $C_{з.ру}$ – витрати на амортизацію, ремонт і технічне обслуговування, грн/га, грн/т.

З врахуванням формул (7.6) і (7.7) отримаємо

$$C_\theta = \theta \cdot \Pi_k; \quad (7.12)$$

$$C_{\theta u} = \theta_u \cdot \Pi_k; \quad (7.13)$$

де Π_k – комплексна вартість палива з врахуванням вартості змащувальних матеріалів, грн/кг.

Витрати на заробітну плату для двох типів МТА, що розглядаються, можна розрахувати по формулам

$$C_z = \frac{1}{W} \sum m_{\text{мех } i} f_i \mu_i; \quad (7.14)$$

$$C_{zu} = \frac{1}{W_u} \sum m_{\text{мех } i} f_i \mu_i; \quad (7.15)$$

де $m_{\text{мех } i}$ – чисельність механізаторів кожного і-го тарифного розряду; f_i – відповідна тарифна ставка, грн/год; μ_i – коефіцієнт, що враховує різні надбавки до заробітної плати (за стаж роботи, класність тощо).

Усереднені значення тарифних ставок f_i в залежності від розряду роботи наведені нижче

Тарифний розряд	1	2	3	4	5	6
Тарифна ставка, грн/год	22,29	24,3	26,75	30,01	35,55	40,12

Тарифні розряди для відповідних операцій вказані в таблиці 6.5.

Для чотирьох допоміжних робітників на картоплезбиральному комбайні по ставкам на ручні роботи наближено слід прийняти $f_i = 22,29$ грн/год. Ставки для трактористів, сівальників та комбайнерів слід прийняти однаковими у відповідності з вказаними вище при $\mu = 1,3$. Значення f_i і μ_i можна уточнити з врахуванням місцевих умов.

Витрати на амортизацію, ремонт і технічне обслуговування звичайних і збиральних МТА слід розраховувати за формулами

$$C_{a.p} = \frac{1}{W} \left(\frac{C_{б.т} \alpha_{a.p.тp}}{100 T_{г.т}} + \frac{C_{б.с} \alpha_{a.p.с}}{100 T_{г.с}} + \frac{n_m C_{б.м} \alpha_{a.p.м}}{100 T_{г.м}} \right); \quad (7.16)$$

$$C_{a.ру} = \frac{1}{W_u} \left(\frac{C_{б.т} \alpha_{a.p.тp}}{100 T_{г.т}} + \frac{C_{б.м} \alpha_{a.p.м}}{100 T_{г.м}} \right), \quad (7.17)$$

де $C_{a.p}$ – витрати на амортизацію, ремонт і технічне обслуговування звичайних агрегатів, грн/га; $C_{a.ру}$ – аналогічні витрати для збиральних агрегатів, грн/т; $C_{б.т}$, $C_{б.с}$, $C_{б.м}$ – балансові ціни відповідно трактора, зчіпки та робочої машини, грн; n_m – число машин в агрегаті; $T_{г.т}$, $T_{г.с}$, $T_{г.м}$ – річні завантаження відповідно трактора, зчіпки і робочої машини, год; $\alpha_{a.p.тp}$, $\alpha_{a.p.с}$, $\alpha_{a.p.м}$ – сумарні норми річних відрахувань на амортизацію (реновацію), ремонт і технічне обслуговування відповідно по трактору, зчіпці і робочій машині, %.

Значення величин, необхідних для розрахунків по формулам (7.16) і (7.17) наведені в таблицях 7.1 і 7.2.

Таблиця 7.1 – Основні дані по тракторам

Трактор	N_n , кВт	C_t , грн	$T_{г.т}$, год	Норми відрахувань, %			
				Р	КР	ПР	ТО
Т-40М	36,76	$100 \cdot 10^3$	1350	12,5	5	4,1	5,8
ЮМЗ-6АКЛ	45,14	$130,6 \cdot 10^3$	1350	10	5	4,1	5,8
МТЗ-80	55,22	$171 \cdot 10^3$	1350	10	5	4,1	5,8
МТЗ-82	55,22	$197,3 \cdot 10^3$	1350	10	5	4,1	5,8
ДТ-75М	66,25	$248 \cdot 10^3$	1300	12,5	6	5	6,4
Т-4А	99,26	$276 \cdot 10^3$	1300	12,5	6,5	5,5	4,7
Т-150	111	$380 \cdot 10^3$	1350	10	7	5	6,4
Т-150К	121,47	$365 \cdot 10^3$	1350	10	7	6	5,5
К-700А	153,67	$485 \cdot 10^3$	1350	10	7	6,8	2,5
К-701	221	$510 \cdot 10^3$	1350	10	7	16,8	2,5

Прийняті позначення: Р – реновація, КР – капітальний ремонт, ПР – поточний ремонт, ТО – технічне обслуговування, C_t – оптова ціна трактора, грн; $T_{г.т}$ – річне завантаження трактора, год.

Балансові ціни $C_{б.т}$, $C_{б.с}$, $C_{б.м}$ визначають через відповідні оптові ціни C_t , C_c , C_m з рівнянь:

$$C_{б.т} = \varphi_t C_t; C_{б.с} = \varphi_c C_c; C_{б.м} = \varphi_m C_m, \quad (7.18)$$

де φ_t , φ_c , φ_m – коефіцієнти, що враховують додаткові витрати на доставку відповідно трактора, зчіпки і робочої машини в господарства, їх складання тощо.

В розрахунках можна наближено прийняти $\varphi_t = \varphi_c = \varphi_m = 1,1$.

Таблиця 7.2 – Основні дані по робочим машинам і зчіпкам

Машина, зчіпка	C_m , C_c , грн	$T_{г.м}$, $T_{г.с}$, год	Норми відрахувань, %	
			Р	ПР+ТО
ПЛН-3-35	$14 \cdot 10^3$	500	12,5	20
ПЛН-4-35	$17,5 \cdot 10^3$	500	12,5	20
ПЛН-5-35	$20 \cdot 10^3$	500	12,5	20
ПЛН-6-35	$34,5 \cdot 10^3$	500	12,5	20
ПЛН-8-35	$37 \cdot 10^3$	500	12,5	20
ПТК-9-35	$60 \cdot 10^3$	500	12,5	20
БЗСС-1	$1,2 \cdot 10^3$	200	20	20
ЛДГ-5А	$36,5 \cdot 10^3$	260	14,2	7
ЛДГ-10А	$72 \cdot 10^3$	260	14,2	7

ЛДГ-15А	$85 \cdot 10^3$	260	14,2	7
ЛДГ-20	$105 \cdot 10^3$	260	14,2	7
КПС-4	$32 \cdot 10^3$	350	14,2	12,5
ЗКШ-6	$21,5 \cdot 10^3$	190	12,5	5
СЗУ-3,6	$38 \cdot 10^3$	160	12,5	7
СН-4Б	$31 \cdot 10^3$	130	14,2	6
СКС-4	$65,5 \cdot 10^3$	140	14,2	6
СКМ-6	$82 \cdot 10^3$	140	14,2	6
КРН-4,2	$42,5 \cdot 10^3$	350	14,2	9
КРН-5,6	$45 \cdot 10^3$	350	14,2	9
ККУ-2А	$200 \cdot 10^3$	200	14,2	9
КС-1,8	$41,5 \cdot 10^3$	170	14,2	12
КСС-2,6	$38,7 \cdot 10^3$	170	14,2	12
КС-2,1	$5 \cdot 10^3$	200	20	7
КДП-4	$11,5 \cdot 10^3$	200	20	7
СП-11	$33 \cdot 10^3$	350	14,2	7
С-11У	$11 \cdot 10^3$	350	14,2	7
СП-16	$45,5 \cdot 10^3$	350	14,2	7
СГ-21	$38,5 \cdot 10^3$	350	14,2	7

На підставі формул (7.6)...(7.18) отримують відповідні прямі експлуатаційні витрати C_e (грн/га) для звичайних агрегатів і C_{eu} (грн/т) для збиральних.

В умовах ринкової економіки повинні корегуватися як номенклатура машин, так і оптові ціни з врахуванням місцевих умов.

Приведені витрати на відміну від прямих експлуатаційних витрат враховують також капіталовкладення, пов'язані з придбанням трактора і сільськогосподарських машин, що входять до складу МТА, у відповідності з формулами

$$C_p = C_e + E_n K_y; \quad (7.19)$$

$$C_{pu} = C_{eu} + E_n K_{yu}; \quad (7.20)$$

$$C_{puF} = 10u C_{pu}, \quad (7.21)$$

де C_p , C_{pu} – приведені витрати відповідно для звичайних і збиральних агрегатів, грн/га, грн/т; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень: $E_n = \frac{1}{T_{cl}}$ (тут T_{cl} – строк служби машини); K_y , K_{yu} – питомі капіталовкладення.

Питомі капіталовкладення розраховують по формулам

$$K_y = \frac{1}{W} \left(\frac{C_{6.7}}{T_{7.7}} + \frac{C_{6.8}}{T_{7.8}} + \frac{n_n C_{6.9}}{T_{7.9}} \right); \quad (7.22)$$

$$K_{yu} = \frac{1}{W_u} \left(\frac{C_{6.7}}{T_{7.7}} + \frac{C_{6.8}}{T_{7.8}} \right), \quad (7.23)$$

Необхідні вихідні дані для розрахунків по формулам (7.22) і (7.23) наведені раніше при $E_n = 0,1$. При наявності більш точних даних для конкретних умов господарства слід їх використовувати.

Ефективні шляхи зменшення експлуатаційних витрат можна намітити на підставі формул, отриманих як в даному завданні, так і в завданні 6. Всі раніше намічені способи підвищення продуктивності МТА одночасно забезпечують зменшення витрат праці і витрат на заробітну плату. Зменшуються у визначених межах також витрата палива і як прямі, так і приведені витрати. Істотного зниження прямих і приведених експлуатаційних витрат можна досягти за рахунок збільшення річного завантаження машин при одночасному зменшенні витрат на ремонт і технічне обслуговування.

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 6.5 згідно заданому варіанту вихідні дані, яких не вистачає: γ_0 ; $m_{\text{мех}}$; тарифний розряд.

2. Визначити витрати праці H при роботі МТА.

3. Визначити питому витрату палива θ на одиницю виконаної агрегатом роботи.

4. Визначити прямі експлуатаційні витрати C_e при роботі МТА.

5. Визначити приведені витрати $C_{\text{п}}$ при роботі МТА.

6. Намітити ефективні шляхи зменшення експлуатаційних витрат.

Результати розрахунків і висновків по всім пунктам завдання представити у вигляді таблиці 1.4.

Практичне заняття №8

Оптимізація експлуатаційних параметрів і режимів роботи машинно-тракторних агрегатів по критеріям ресурсозбереження

Мета роботи – опанувати сучасні методи оптимізації параметрів і режимів роботи МТА по критеріям ресурсозбереження і високої продуктивності.

Загальні відомості.

Оптимальними (найкращими) вважають такі експлуатаційні параметри і режими роботи МТА, при яких вибраний експлуатаційний показник (критерій оптимальності) досягає максимуму (наприклад, продуктивність) або мінімуму (наприклад, експлуатаційні витрати).

З раніше виконаних завдань виходить, що до основних експлуатаційних параметрів МТА, від яких залежать його техніко-економічні показники, відносяться потужність N_n і експлуатаційна маса m трактора, ширина захвату B і робоча швидкість v . Основні режими роботи МТА – режими робочого і холостого ходів агрегату і режим роботи двигуна при зупиненому агрегаті, доля якого незначна по витратам часу і ресурсів. Вказані параметри і режими роботи МТА можна оптимізувати як на стадії створення нових тракторів і сільськогосподарських машин, так і в виробничих умовах на базі техніки, що є в господарстві. В даному завданні передбачена оптимізація параметрів і режимів роботи МТА на базі тракторів і сільськогосподарських машин, що є в господарствах. З врахуванням складності МТА як технічної системи і різноманіття режимів роботи в основу оптимізації покладено багаторівневий системний підхід з використанням декількох взаємозв'язаних критеріїв ресурсозбереження. У відповідності з рівнями оптимізації, що розглядаються, складені і пункти завдання. Оскільки матеріал завдання охоплює і узагальнює основні питання першого розділу курсу, то його можна використовувати і в якості самостійної індивідуальної або дослідницької роботи з поглибленим аналізом впливу діючих факторів і параметрів МТА на його техніко-економічні показники.

Таблиця 8.1 – Варіанти завдань

Номер варіанту	Операція	Довжина гону, м	Кут схилу, град	$k_{об}$	Особливі умови				
					СП	НМ	ПП	А1	УПТ
1	Боронування	400...600	0	0,91			+		
2	Лущення стерні	600...1000	2	0,89	+	+		+	
3	Суцільна культивування	400...600	2	0,85					
4	Міжрядна культивування	400...600	0	0,87				+	+
5	Оранка важких ґрунтів	400...600	0	0,90		+		+	
6	Оранка середніх ґрунтів	400...600	2	0,92	+			+	
7	Оранка легких ґрунтів	300...400	3	0,90				+	
8	Дискування	400...600	0	0,89	+			+	
9	Посів зернових	400...600	1	0,88		+			
10	Міжрядна культивування	300...400	1	0,85				+	+

11	Прикочування	300...400	2	0,86					
12	Боронування	Більше 1000	2	0,93					
13	Лущення стерні	300...400	1	0,85				+	
14	Суцільна культивация	Більше 1000	1	0,92					
15	Посів зернових	300...400	2	0,88		+			
16	Посів зернових	600...1000	1	0,92					
17	Дискування	Більше 1000	2	0,93	+			+	
18	Посів зернових	400...600	1	0,85					
19	Міжрядна культивация	400...600	0	0,87				+	+
20	Прикочування	600...1000	3	0,89					
21	Оранка важких грунтів	600...1000	0	0,91				+	
22	Оранка середніх грунтів	600...1000	1	0,93		+		+	
23	Оранка легких грунтів	600...1000	3	0,95				+	
24	Міжрядна культивация	400...600	1	0,87				+	+
25	Боронування	Більше 1000	3	0,93			+		
26	Суцільна культивация	Більше 1000	1	0,92			+		
27	Оранка важких грунтів	400...600	1	0,90				+	
28	Оранка середніх грунтів	400...600	0	0,91				+	
29	Оранка легких грунтів	300...400	2	0,84				+	
30	Суцільна культивация	400...600	0	0,88	+	+	+		

Прийняті позначення: $k_{об}$ – узагальнений поправочний коефіцієнт; СП – складні погодні умови; НМ – недостатня кількість механізаторів; ПП – ґрунти переуцільнені; А1 – одномашинний агрегат; УПТ – універсально-просапний трактор. Знак «+» означає наявність відповідної умови.

При визначенні оптимальної потужності трактора, що відповідає вимогам ресурсозбереження високій продуктивності, доцільно в якості основного критерію оптимальності вибрати мінімум приведених витрат, що включає в себе у відповідності з формулами (7.9) і (7.19) всі основні види витрат:

$$C_{\pi} = C_{\varepsilon} + C_{\varepsilon} + C_{\varepsilon p} + E_{\pi} K_y \rightarrow \min. \quad (8.1)$$

Приведені витрати слід представити у вигляді функції потужності $C_{\pi} = f_{\pi}(N_{\pi})$ і з врахуванням умови $dC_{\pi}/dN_{\pi} = 0$ отримати оптимальну потужність трактора $N_{\pi \text{ опт}}$. Кожний доданок в рівнянні (8.1) також слід виразити в функціях потужності, включаючи продуктивність W , що входить до складу цих доданків.

Витрати на паливо і змащувальні матеріали C_{θ} (грн/га) отримаємо в функції потужності N_{π} на підставі формул (7.6) і (7.12) в наступному вигляді:

$$C_{\theta} = \theta C_{\kappa} = \frac{N_{\pi} \varepsilon N g \gamma_0}{10^5 W} C_{\kappa}. \quad (8.2)$$

В цій формулі можна використовувати усереднені значення коефіцієнту завантаження двигуна і питомої витрати палива двигуном: $\varepsilon_N = 0,9$; $g_e = 256$ г/(кВт·год). Значення γ_0 для заданих технологічних операцій слід виписати з таблиці 6.5, а $\Pi_k =$ грн/кг отримано в завданні 7.

Значення продуктивності МТА W (га/год) в функції потужності N_H отримаємо на підставі рівняння (6.13). Для цього уявимо чисту продуктивність агрегату Π (м²/с) з врахуванням формул (4.1), (4.3) в такому вигляді:

$$\Pi = Bv = \frac{P_{кр}}{k_a} v = \frac{N_{кр}}{k_a} = N_H \frac{\varepsilon_N \eta_T}{k_a} = N_H p_N, \quad (8.3)$$

де k_a – питомий опір агрегату; $p_N = \varepsilon_N \eta_T / k_a$.

По фізичному сенсу p_N відповідає питомій чистій продуктивності агрегату, що приходить на одиницю номінальної потужності N_H двигуна трактора. На даному етапі оптимізації параметрів МТА з врахуванням точності використовуваної вихідної інформації можна прийняти усереднені постійні значення питомого опору агрегату k_a і тягового ККД трактора η_T . Середнє значення k_a можна визначити на підставі формул (3.4), (3.6) і (3.9) при середній швидкості $v = 2$ м/с. Середні значення тягового ККД тракторів η_T наведені в таблиці 8.2.

Трактор	η_T	
	стерня	поле, підготовлене під посів
Гусеничний	0,78	0,68
Колісний (4К4)	0,70	0,62
Колісний (4К2)	0,62	0,52

Примітка. Стерню в якості ґрунтового фону приймають для операцій оранки і лушення стерні, поле, підготовлене під посів – для інших операцій.

На підставі формул (6.13) і (8.3) отримаємо продуктивність МТА в функції потужності

$$W = 0,36 k_{об} \left(\frac{h_w p_N N_H - a_w p_N N_H^2}{1 + k_w p_N N_H} \right). \quad (8.4)$$

Значення h_w , a_w і k_w для відповідних операцій в залежності від довжини гону вказані в таблиці 6.5, а значення $k_{об}$ – в таблиці 8.1.

Витрати на заробітну плату в функції потужності отримаємо на підставі формул (7.14) і (8.4):

$$C_z = \frac{m_{мех} f \mu}{W}. \quad (8.5)$$

Для посівних агрегатів в середньому можна прийняти $m_{мех} = 2$ (один тракторист і один сівальник), при виконанні інших операцій $m_{мех} = 1$. Приймаємо також середні значення тарифної ставки $f = 35,55$ грн/год і поправочного коефіцієнту $\mu = 1,3$ для всіх механізаторів.

Витрати на амортизацію, ремонт і технічне обслуговування $C_{а,р}$ знаходимо в функції потужності N_H на підставі формул (7.16) і (7.18). З аналізу статистичних даних виходить, що балансові ціни зчіпки $\Pi_{б,с}$ і машин $\Pi_{б,м}$ наближено можна прийняти пропорційними балансовій ціні трактора: $\Pi_{б,т} = \varphi_T \Pi_T$. Тоді

$$C_{а,р} = \frac{\varphi_T \Pi_T}{100W} \left(\frac{\alpha_{а,р,т}}{T_{г,т}} + \frac{\gamma_{б,с} \alpha_{а,р,с}}{T_{г,с}} + \frac{\gamma_{б,м} \alpha_{а,р,м}}{T_{г,м}} \right), \quad (8.6)$$

де $\gamma_{б,с} = \Pi_{б,с} / \Pi_{б,т}$, $\gamma_{б,м} = \Pi_{б,м} / \Pi_{б,т}$ – коефіцієнти пропорційності (табл. 8.3).

Таблиця 8.3 – Середні значення коефіцієнтів пропорційності

Технологічна операція	$\gamma_{б,м}$	$\gamma_{б,с}$
Лушення стерні і дискування	0,197	0
Оранка	0,054	0

Боронування зубовими боронами	0,053	0,224
Суцільна культивуація	0,160	0,086
Міжрядна культивуація	0,269	0
Прикочування	0,251	0,181
Посів зернових	0,257	0,0632

Необхідні вихідні дані для визначення $\alpha_{\text{ар.тр}}$, $\alpha_{\text{ар.с}}$ і $\alpha_{\text{ар.м}}$, а також $T_{\text{г.т}}$, $T_{\text{г.с}}$ і $T_{\text{г.м}}$ наведені в завданні 7 при $\varphi_{\text{т}} = 1,1$.

Оптову ціну $C_{\text{т}}$ тракторів всіх типів в спрощеному варіанті можна виразити в функції потужності $N_{\text{н}}$ лінійною статистичною залежністю:

$$C_{\text{т}} = a_{\text{т}} + b_{\text{т}} N_{\text{н}}, \quad (8.7)$$

де $a_{\text{т}} =$ грн; $b_{\text{т}} =$ грн/кВт – статистичні коефіцієнти.

Перевага спрощеної формули (8.7) полягає в можливості отримання оптимального аналітичного рішення з достатньою точністю.

При поглиблених розрахунках стосовно до перспективних тракторів великої потужності на підставі чисельного методу оптимізації із застосуванням ЕОМ можна використовувати параболічну залежність:

$$C_{\text{т}} = a + b N_{\text{н}} + c N_{\text{н}}^2. \quad (8.8)$$

Статистичні коефіцієнти a , b , c визначають відомими методами.

На підставі формули (8.8) можна виконати багатоваріантну студентську дослідницьку роботу по визначенню закономірностей впливу різних факторів на результати оптимізації. В межах даного завдання достатньо вирішити спрощене рівняння (8.7).

В функції потужності можна виразити питомі капіталовкладення (формула (7.22)):

$$K_{\text{у}} = \frac{\varphi_{\text{т}} C_{\text{т}}}{W} \left(\frac{1}{T_{\text{г.т}}} + \frac{\gamma_{\text{б.с}}}{T_{\text{г.с}}} + \frac{\gamma_{\text{б.м}}}{T_{\text{г.м}}} \right). \quad (8.9)$$

Підставивши в формулу (8.1) отримані значення доданків, можна визначити приведені витрати в функції потужності:

$$C_{\text{п}} = (A_{\text{с}} N_{\text{н}} + D_{\text{с}}) / \left[0,36 k_{\text{об}} \left(\frac{h_{\text{в}} p_{\text{Н}} N_{\text{н}} - a_{\text{в}} p_{\text{Н}}^2 N_{\text{н}}^2}{1 + k_{\text{в}} p_{\text{Н}} N_{\text{н}}} \right) \right], \quad (8.10)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_{\text{с}} &= 10^{-3} \varepsilon_{\text{Н}} g_{\text{с}} \gamma_0 C_{\text{к}} + 10^{-2} b_{\text{т}} \varphi_{\text{т}} \left(\frac{\alpha_{\text{ар.тр}}}{T_{\text{г.т}}} + \frac{\gamma_{\text{б.с}} \alpha_{\text{ар.с}}}{T_{\text{г.с}}} + \frac{\gamma_{\text{б.м}} \alpha_{\text{ар.м}}}{T_{\text{г.м}}} \right) + \\ &+ E_{\text{н}} b_{\text{т}} \varphi_{\text{т}} \left(\frac{1}{T_{\text{г.т}}} + \frac{\gamma_{\text{б.с}}}{T_{\text{г.с}}} + \frac{\gamma_{\text{б.м}}}{T_{\text{г.м}}} \right); \\ D_{\text{с}} &= m_{\text{мех}} f \mu + 10^{-2} a_{\text{т}} \varphi_{\text{т}} \left(\frac{\alpha_{\text{ар.тр}}}{T_{\text{г.т}}} + \frac{\gamma_{\text{б.с}} \alpha_{\text{ар.с}}}{T_{\text{г.с}}} + \frac{\gamma_{\text{б.м}} \alpha_{\text{ар.м}}}{T_{\text{г.м}}} \right) + \\ &+ E_{\text{н}} a_{\text{т}} \varphi_{\text{т}} \left(\frac{1}{T_{\text{г.т}}} + \frac{\gamma_{\text{б.с}}}{T_{\text{г.с}}} + \frac{\gamma_{\text{б.м}}}{T_{\text{г.м}}} \right). \end{aligned}$$

Оптимальне значення потужності $N_{\text{н опт}}$ по мінімуму приведених витрат $C_{\text{п}} \rightarrow \min$ отримуємо з виразу (8.10) при умові $dC_{\text{п}}/dN_{\text{н}} = 0$:

$$N_{\text{н опт}} = \frac{1}{k_{\text{в}} p_{\text{Н}} \beta_{\text{с}}} \left(\sqrt{1 + \frac{h_{\text{в}} k_{\text{в}}}{a_{\text{в}}} \beta_{\text{с}}} - 1 \right), \quad (8.11)$$

$$\text{де } \beta_{\text{с}} = 1 + \frac{A_{\text{с}}}{D_{\text{с}} p_{\text{Н}}} \left(\frac{1}{k_{\text{в}}} + \frac{h_{\text{в}}}{a_{\text{в}}} \right).$$

На підставі формул (8.3) і (8.11) можна визначити також відповідну оптимальну чисту продуктивність агрегату:

$$P_{\text{опт}} = N_{\text{н опт}} p_{\text{Н}} = \frac{1}{k_{\text{в}} \beta_{\text{с}}} \left(\sqrt{1 + \frac{h_{\text{в}} k_{\text{в}}}{a_{\text{в}}} \beta_{\text{с}}} - 1 \right). \quad (8.12)$$

З рівнянь (8.11) і (8.12) виходить, що оптимальні значення $N_{\text{порт}}$ і $P_{\text{ортне}}$ залежать від узагальненого поправочного коефіцієнту $k_{\text{об}}$ на місцеві умови, що істотно розширює можливості практичного застосування результатів оптимізації в різних ґрунтово-кліматичних зонах. Крім того, згідно виразу (8.11) оптимальна потужність мало залежить від коливання цін в ринкових умовах, так як визначається відношенням A_c/D_c , що стабільно при будь-яких цінах. Така стабільність відношення A_c/D_c обумовлена тим, що значення A_c і D_c збільшуються або зменшуються приблизно пропорційно зміні цін. Підставивши значення оптимальної потужності $N_{\text{ортв}}$ формули (8.4) і (8.10), отримаємо відповідні продуктивність МТА і мінімальні приведені витрати C_{pmin} .

Значення C_{pmin} , $W_{\text{с.п}}$ і $N_{\text{орт}}$ можна визначити і по графікам $C_{\text{п}}=f_{\text{п}}(N_{\text{н}})$ і $W=f_{\text{w}}(N_{\text{н}})$ (див. рисунок 4.1). Для цього необхідно підставити в формули (8.4) і (8.10) значення потужності $N_{\text{н}}$, що послідовно збільшуються і відкладати на графіку у вибраному масштабі відповідні значення продуктивності агрегату W_i приведених витрат $C_{\text{п}}$. Отримані точки з'єднати плавною лінією. Аналогічне числове рішення можна отримати і для більш точної статистичної залежності (8.8).

Отримана при оптимальній потужності $N_{\text{орт}}$ продуктивність МТА $W_{\text{с.п}}$ може виявитися надто малою при стиснутих термінах виконання польових робіт або при недостатній чисельності механізаторів. Тоді необхідно прийняти компромісне рішення, тобто за рахунок невеликого прийнятного відхилення від мінімальних витрат $\Delta C_{\text{п}}$ отримати компромісне значення потужності трактора $N_{\text{н.к}}$, що забезпечує істотне збільшення продуктивності МТА. Такий агрегат в достатньому ступеню буде відповідати вимогам ресурсозбереження і високої продуктивності. Схема компромісного рішення показана раніше на рисунку 4.1.

Щоб визначити компромісне значення потужності $N_{\text{н.к}}$, необхідно в формулу (8.10) замість $C_{\text{п}}$ підставити компромісні приведені витрати $C_{\text{п.к}}$, що визначаються з рівняння

$$C_{\text{п.к}} = C_{\text{п min}} + \Delta C_{\text{п}} = C_{\text{п min}} (1 + \varepsilon_{\text{с.п}}), \quad (8.13)$$

де $\varepsilon_{\text{с.п}} = \Delta C_{\text{п}} / C_{\text{п min}}$ – відносне відхилення від $C_{\text{пmin}}$.

Значення $C_{\text{пmin}}$ визначено за формулою (8.10) при $N_{\text{н}} = N_{\text{орт}}$. Компромісне значення потужності $N_{\text{н.к}}$ також отримаємо з виразу (8.10) при $C_{\text{п}} = C_{\text{п.к}}$:

$$N_{\text{н.к}} = F_{\text{с.к}} + \sqrt{F_{\text{с.к}}^2 - \frac{A_c}{0,36 k_{\text{об}} p_N^2 a_w (1 + \varepsilon_{\text{с.п}}) C_{\text{п min}} + p_N A_c k_w}}, \quad (8.14)$$

$$\text{де } F_{\text{с.к}} = \frac{0,36 k_{\text{об}} p_N h_w (1 + \varepsilon_{\text{с.п}}) C_{\text{п min}} - p_N A_c k_w - A_c}{2[0,36 k_{\text{об}} p_N^2 a_w (1 + \varepsilon_{\text{с.п}}) C_{\text{п min}} + p_N A_c k_w]}.$$

Задаючи різні значення $\varepsilon_{\text{с.п}}$ знаходимо відповідні компромісні значення потужності $N_{\text{н.к}}$. Потім по формулі (8.4) при $N_{\text{н}} = N_{\text{н.к}}$ можна визначити компромісні значення продуктивності W агрегату і її наступний приріст

$$\Delta W = W_{\text{к}} - W_{\text{с.п}}.$$

В межах даного завдання слід використовувати значення $\varepsilon_{\text{с.п}} = 0,05$. Підставивши це значення $\varepsilon_{\text{с.п}}$ в формулу (8.14) отримаємо діапазон ресурсозберігаючих потужностей трактора $N_{\text{орт}} \dots N_{\text{н.к}}$ аналогічно із завданням 4. При сприятливих умовах роботи (при відсутності знаку «+» в графах СП і НМ таблиці 8.1) ресурсозберігаючий трактор (з марок, вказаних в таблиці 7.2) слід вибрати і лівій половині отриманого діапазону потужностей. В більш складних умовах, включаючи погодні і недостатню чисельність механізаторів, необхідно вибрати трактор в правій половині діапазону потужності $N_{\text{орт}} \dots N_{\text{н.к}}$. Для роботи на переуцільнених ґрунтах більш переважно вибрати гусеничний трактор. Рішення по другому пункту завдання слід завершити визначенням значень продуктивності агрегату (формула (8.4)) і приведених витрат (формула (8.10)) з врахуванням значення потужності $N_{\text{н}}$ вибраного трактора.

При необхідності можна визначити і прямі експлуатаційні витрати, прийнявши у відповідних рівняннях $E_{\text{н}} = 0$. Розрахунками встановлено, що оптимальні і компромісні значення потужності по мінімуму прямих експлуатаційних витрат знаходяться в межах діапазону $N_{\text{орт}} \dots N_{\text{н.к}}$, тому необхідність в додаткових розрахунках відсутня.

Подальше покращення показників ресурсозбереження і підвищення продуктивності МТА можна забезпечити за рахунок оптимізації режиму робочого ходу, в тому числі робочої швидкості v_{opt} і ширини захвату B_{opt} . Для багатомашинних агрегатів необхідно розрахувати також число машин $n_{m\ opt}$ і фронт зчіпки Φ .

Відповідна методика оптимізації викладена в завданні 4, в якій в якості критерію оптимальності прийнято мінімум питомих енерговитрат при робочому ході МТА: $E_p \rightarrow \min$, еквівалентний мінімуму питомої робочої витрати палива на одиницю обробленої площі: $\theta_p \rightarrow \min$. Тоді на підставі формул (4.10), (4.11), (4.15)...(4.18) і з врахуванням $\varepsilon_b=0$ можна розрахувати оптимальні теоретичну $v_{t\ opt}$ і робочу v_{opt} швидкості руху МТА, число машин $n_{m\ opt}$, ширину захвату B_{opt} і необхідний фронт зчіпки Φ_c . При цьому слід враховувати також обмеження на буксування: $\delta_{opt} \leq \delta_d$.

Рішення по пункту 3 завдання завершується визначенням фактичного значення коефіцієнту використання номінального тягового зусилля трактора $\varepsilon_{кр.ф}$ (див. формулу (4.20)). При $\varepsilon_{кр.ф} < 0,85$ необхідно перевірити можливість роботи МТА ні більш високій швидкості з метою зменшення витрати палива.

Ресурсозберігаючий спосіб руху складеного агрегату слід вибрати на підставі методики, викладеній в завданні 5, включаючи визначення оптимальної ширини загону. Отримані результати оптимізації дозволять покращити раніше досягнуті показники ресурсозбереження і підвищення продуктивності МТА.

Перспективні напрямки ресурсозбереження і підвищення продуктивності МТА доцільно намітити на підставі даних, викладених в завданнях 6 і 7. Додаткові рекомендації можна скласти на підставі загальної формули (8.10).

Зміст завдання

1. Виписати із таблиці 8.1 вихідні дані по відповідному варіанту завдання.
2. Визначити для заданих умов роботи необхідну оптимальну потужність трактора у відповідності з вимогами ресурсозбереження і високої продуктивності і вибрати трактор.
3. Розрахувати для вибраного трактора оптимальні робочу швидкість і ширину захвату, а також число машин в агрегаті і фронт зчіпки.
4. Вибрати ресурсозберігаючий спосіб руху МТА і розрахувати оптимальну ширину загону.
5. Обґрунтувати перспективні напрямки ресурсозбереження і підвищення продуктивності МТА.

Отримані результати оптимізації і висновки по кожному пункту завдання слід представити у вигляді таблиці 1.4.

Практичне заняття №9

Аналіз експлуатаційної надійності агрегатів, ланок і технологічних комплексів

Мета роботи – опанування методів та набуття навичок у визначенні експлуатаційної надійності машин, агрегатів, технологічних ланок комплексів і обґрунтування вимог до надійності технічних засобів в період виконання виробничого процесу.

Зміст завдання.

1. Вибрати виробничу ситуацію з таблиці 9.1 і технічну характеристику машин з таблиць 9.2 та 9.3.
2. Визначити ймовірність безвідмовної роботи кожної машини і машинно-тракторних агрегатів всіх технологічних ланок комплексу.
3. Проаналізувати експлуатаційну надійність кожного агрегату, попередньо визначивши тривалість його працездатного стану; середній час, протягом якого агрегат знаходиться в стані відмови через кожний з елементів; середній час безвідмовної роботи агрегату; середній час простою агрегату.
4. Скласти структурну схему і визначити ймовірність безвідмовної роботи кожної ланки технологічного комплексу.
5. Скласти структурну схему всього технологічного комплексу і визначити ймовірність його безвідмовної роботи.
6. Визначити вимоги до безвідмовності кожної технологічної ланки і агрегату для забезпечення виконання виробничого процесу у встановлені терміни з довірчою ймовірністю 0,95.

Таблиця 9.1 – Варіанти завдань

Склад посівного комплексу	Номер варіанту завдання														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Число машин (агрегатів) при обсягу робіт, га														
	2000					2500					3000				
Ланка підготовки та транспортування насіння															
Завантажувач зерна ЗСП-100	1					1					1				
Протравлювач ЗАВ-20	2					2					3				
Завантажувач ПФ-0,75	1					1					1				
Завантажувач сівалок ЗАУ-3	2					3					3				
Ланка підготовки та транспортування добрив															
Завантажувач ПФ-0,75	2					2					2				
Подрібнювач ИСУ-4А	2					2					2				
Транспортний засіб ЗАУ-3	2					3					3				
Ланка передпосівної підготовки ґрунту															
Агрегати ДТ-75М+СП-16+2КПС-4+8БЗС-1	3					4					5				
Ланка підготовки полів															
Агрегати МТЗ-80+СЗ-3,6+2БП-0,6А	2					3					3				
Посівна ланка №1															

Агрегати ДТ-75М+ СП-11У+2СЗТ- 3,6+8БЗС-1	3	4	4
Посівна ланка №2			
Агрегати Т-150К+СП- 16+3СЗ-3,6+63БП-0,6А	3	4	4

Таблиця 9.2 – Склад і показники надійності посівного комплексу для роботи на площі 400 га

Елементи посівного комплексу	Кількість машин п в агрегаті	Напрацювання на відмову, год	Середній час усунення відмови, год
Ланка підготовки та транспортування насіння			
Завантажувач зерна ЕСП-100	1	100	4,2
Протравлювач ЗАВ-20	1	94	2,8
Завантажувач зерна в транспортний засіб ПФ-0,75	1	95	2,5
Транспортний засіб ЗАУ-3	2	84	4,5
Ланка підготовки та транспортування добрив			
Завантажувач ПФ-0,75	1	95	2,5
Подрібнювач ИСУ-4А	2	60	2,8
Транспортний засіб ЗАУ-3	2	84	45
Ланка підготовки полів			
Трактор МТЗ-80	1	86	4,8
Сівалка СЗУ-3,6	1	38	2,2
Борони БЗС-1	4	70	0,4
Посівна ланка №1 (шість агрегатів)			
Трактор ДТ-75	1	76	5,5
Зчіпка СП-11А	1	60	0,8
Сівалка СЗУ-3,6	2	38	2,2
Борони БЗС-1	7	70	0,4
Посівна ланка №2 (три агрегати)			
Трактор Т-150К	1	82	5,5
Зчіпка СП-16	1	60	0,8
Сівалка СЗ-3,6	1	38	2,2
Борони БЗС-1	10	70	0,4
Посівна ланка №3 (чотири агрегати)			
Трактор МТЗ-80	1	86	4,8
Сівалки СЗ-3,6Б	1	38	2,2
Борони БЗС-1	4	70	0,4

7. Зробити висновок про технічний стан технологічного комплексу та намітити заходи по технічному забезпеченню виробничого процесу.

Загальні відомості.

Теоретичні основи надійності. Сільськогосподарський агрегат розглянемо як систему, в якій відмова одного елемента викликає відмову всієї системи.

Сумарний час експлуатації агрегату

$$t = t_p(t) + t_v(t), \quad (9.1)$$

де $t_p(t)$, $t_v(t)$ – сумарний час відповідно роботи і відновлення агрегату.

Таблиця 9.3 – Статистичні показники надійності сільськогосподарських машин

Машина	Показники				Коефіцієнт готовності К _г
	безвідмовності		відновлення працездатності		
	Т _{о ср} , ГОД	σ, ГОД	Т _{в ср} , ГОД	σ _в , ГОД	
Плуги:					
ПЛН-3-35	7,93	7,2	0,28	0,26	0,973
ПЛН-5-35	10,39	7,81	0,49	0,44	0,955
ПТК-9-35	11,12	8,13	0,66	0,49	0,944
Культиватори:					
КПС-4	10,83	6,71	0,57	0,29	0,95
КРН-4,2	11	7,12	0,69	0,17	0,94
КРН-5,6	14,41	4,2	0,92	0,21	0,94
КРН-8,4	5,46	5,5	0,38	0,37	0,935
Луцильники:					
ЛДГ-10	33,95	17,1	1,05	0,5	0,97
ЛДГ-15	26,6	13,93	1,4	0,75	0,95
Сівалки:					
СЗТ-3,6	18,4	16,13	1,05	1,2	0,945
СУПН-8	11,12	10,7	0,71	0,24	0,94
Комбіновані агрегати:					
АКП-2,5	46,5	4,15	0,46	0,49	0,91
РВК-3,6	11,43	7,18	1,27	0,71	0,9
Косарки:					
КПВ-3	12,88	10,16	3,74	3,29	0,72
КПРН-3	10,96	9,49	0,7	0,64	0,94
КПС-5Г	6,16	5,93	0,84	0,56	0,88
Е-301	4,71	12,49	2,16	2,1	0,87
Граблі:					
ГПП-6	28,77	25,78	5,84	5,64	0,83
ГВР-6	11,02	10,13	2,1	1,93	0,84
Підбіральники:					
ПК-1,6А	15,54	12,03	1,17	1,05	0,93
ПРП-1,6	12,71	9,32	2,07	1,73	0,86
К-453	17,04	33,4	4,13	3,79	0,89
Комбайни:					
КУФ-1,8	15,33	15,03	2,92	2,56	0,86
КПИ-2,4	13,02	12,4	2,48	2,46	0,84
КСС-2,6	24,67	16,35	4,7	3,12	0,84
КСК-100А	27,2	22,8	6,31	3,62	0,81
Е-28 (підбір)	32,19	15,7	4,81	3,9	0,87
Е-28 (косіння)	41,12	33,49	11,6	10,06	0,78
КПКУ-75	18,69	15,3	3,56	2,7	0,84
Причіп тракторний 2ПТС-6	83,3	52,6	1,7	1,86	0,98

Ймовірність безвідмовної роботи агрегату в інтервалі часу $[0; t]$ визначається як ймовірність співпадання безвідмовної роботи всіх елементів:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (9.2)$$

де n – число елементів; $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елементу, якщо вважати, що елементи незалежні.

Виразивши $P_i(t)$ через інтенсивність відмов $\lambda_i(t)$ отримаємо

$$P_c(t) = \exp \left[-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] = \exp[-\lambda_c(t)].$$

При експоненціальному законі розподілення часу безвідмовної роботи елементів надійність системи також підпорядковується експоненціальному закону.

При визначенні надійності агрегату з відновленням розглянемо його як складну систему, що складається з багатьох елементів.

Нехай агрегат знаходиться в двох станах: $x(t) = i$, якщо в момент часу t саме i -й елемент знаходиться в стані відмови, і дорівнює 0, якщо всі елементи агрегату працездатні. Коли елемент i відмовляє в момент часу t_{pi} , агрегат знаходиться в стані відмови t_{pi} . Потім агрегат продовжує працювати, доки не відмовить елемент j і т.д. Загальне число відмов агрегату в інтервалі часу $[0; t]$

$$N(t) = \sum N_i(t),$$

де $N_i(t)$ – число відмов i -го елементу протягом часу t .

Припустимо, що середній час безвідмовної роботи i -го елементу дорівнює $t_i (0 \leq t_i \leq \infty)$, а середній час відновлення – $t_{bi} (0 \leq t_{bi} \leq \infty)$ і не залежить від виду відповідних розподілень. Тоді граничне значення коефіцієнту готовності

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t_p(t)}{t} = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{t_{bi}}{t_{pi}} \right]^{-1}. \quad (9.3)$$

Середнє число відмов за одиницю часу для елементів кожного типу

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N(t)}{t} = \frac{K_r}{t_{pi}}. \quad (9.4)$$

Середній час безвідмовної роботи агрегату

$$t_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{pi}} \right)^{-1}. \quad (9.5)$$

Середній час простою агрегату

$$\bar{t}_s = \bar{t}_p \sum_{i=1}^n \frac{t_{bi}}{t_{pi}}. \quad (9.6)$$

Якщо в господарстві організована служба профілактики (технічного обслуговування) і усунення відмов (відновлення), то агрегат в будь-який момент може знаходитися в одному з трьох станів: S_1 –працездатний; S_0 –аварійний ремонт; S_2 –плановий простій при проведенні ТО. Позначимо λ і $\lambda_{пл}$ – інтенсивності аварійних і планових відмов, μ і $\mu_{пл}$ – інтенсивності відповідних відновлень.

Ймовірності станів агрегату при $t \rightarrow \infty$

$$P_1 = K_r = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda_{пл}}{\mu_{пл}} \right]^{-1}; P_0 = q_{ав} = P_1 \frac{\lambda}{\mu}; P_2 = q_{пл} = P_1 \frac{\lambda_{пл}}{\mu_{пл}}, \quad (9.7)$$

де $q_{ав}$, $q_{пл}$ – коефіцієнти відповідно аварійного і планового простоїв агрегатів.

Для багатомашинного агрегату відмова будь якого елементу є відмовою всього агрегату. В загальному випадку число станів агрегату $k < n$, так як можливе суміщення ремонтів окремих елементів агрегату по часу.

Ймовірності станів для стаціонарного режиму

$$P_1 = K_r = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_{плj}}{\mu_{плj}} \right]^{-1}; P_0 = q_{ав} = P_1 \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}; P_2 = q_{пл} = P_1 \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_{плj}}{\mu_{плj}}$$

Ймовірність відновлення агрегату за час t при умові, що початок відновлення співпадає з моментом відмови,

$$P_s(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_{ав}} [1 - \exp(-\mu_j)]. \quad (9.8)$$

Частоту планових обслуговувань багатомашинного агрегату визначають з виразу $\lambda_{пл} = m_u / T_{ц}$ (тут m_u – число планових технічних обслуговувань і ремонтів (ТОР) протягом ремонтного циклу $T_{ц}$, тривалість якого визначається якнайменше загальне кратне значення періодичності планових обслуговувань елементів $T_{плі}$. В той же час $T_{плі} = 1/\lambda_{плі}$).

Середній час однієї ремонтно-технічної дії

$$\bar{t}_{вi} = \frac{1}{m_{ц}} \sum_1^k \max t_{в.пліj}, \quad (9.9)$$

де $\max t_{в.пліj}$ – найбільший час планового ТОР елементу агрегату.

В технологічних ланках агрегати, як правило, працюють паралельно.

Технологічна ланка буде працювати, якщо справні г агрегатів з n, хоча продуктивність його буде нижче. Відмова ланки може бути представлена як ймовірність невиконання плану в термін, тобто відмова наступить при умові відмови m агрегатів, яких достатньо для забезпечення своєчасного виконання роботи.

Ймовірність безвідмовної роботи г агрегатів з n розраховують по формулі:

$$P_c(t) = \sum_{x=r}^n \frac{n! P_i^x (1-P_i)^{n-x}}{x!(n-x)!}, \quad (9.10)$$

де P_i – ймовірність безвідмовної роботи i-го агрегату.

При обчисленні надійності складної системи її елементи об'єднують в підсистеми, а потім їх розглядають як окремі елементи.

Розглянемо технологічну ланку, працездатний стан якої підтримується в процесі експлуатації. Нехай ланка складається з m агрегатів. У випадку відмови однієї з них ланка працює, агрегат, що відмовив, відновлюється. Ланка стає непрацездатною у випадку відмови всіх агрегатів одночасно до відновлення однієї з них.

Таким чином, ланка може знаходитися в $k = m + 1$ станах: S_m – працездатні всі агрегати; S_{m-1} – непрацездатний один агрегат тощо; S_1 – працездатний один агрегат; S_0 – непрацездатна вся ланка.

Для марковского процесу при $t \rightarrow \infty$ ппстах ремонтно-технічної дії ймовірності станів визначають з виразів

$$P_k = \frac{m! (\lambda/\mu)^k}{k! (m-k)!} P_m; \quad 1 < k \leq m;$$

$$P_k = \frac{m! (\lambda/\mu)^k}{n^{k-n} (m-k)!} P_m; \quad n < k \leq m. \quad (9.11)$$

Ймовірність відмови ланки $P_0 = m! (\lambda/\mu)^k$.

Для визначення надійності агрегатів, ланок і комплексів можуть бути використані статистичні моделі з послідовним і паралельним з'єднанням елементів, а також при їх сполученнях.

Послідовне з'єднання елементів. Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_1^n P_i. \quad (9.12)$$

Паралельне з'єднання елементів. Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c = 1 - \prod_1^n (1 - P_i). \quad (9.13)$$

Комбінації паралельного і послідовного з'єднання елементів. Для обчислення надійності систем елементи А...Д об'єднують в підсистеми і потім визначають надійність всієї системи:

при паралельно-послідовному з'єднанні

$$P_{AB} = 1 - q_A q_B; \quad P_{CD} = 1 - q_C q_D; \quad P_c = P_{AB} P_{CD} \quad (9.14)$$

при послідовно-паралельному з'єднанні

$$P_{AC} = P_A P_C; \quad P_{BD} = P_B P_D; \quad P_c = 1 - (1 - P_{AC})(1 - P_{BD}), \quad (9.15)$$

де q_A, q_B, q_C, q_D – ймовірності відмов елементів: $q_i = 1 - P_i$.

Складне з'єднання елементів. В практиці організації технологічних комплексів можливі такі взаємодії ланок, коли відмова однієї з них може порушити роботу відразу декількох ланок або всього комплексу. В цьому випадку для визначення ймовірності безвідмовної роботи технологічного комплексу необхідно враховувати всі взаємовиключаючі способи появи відмов.

Розглянемо комплекс, що складається з трьох (для спрощення) ланок А, В, С (рис. 9.1). Застосуємо метод оцінки всіх можливих станів ланок комплексу.

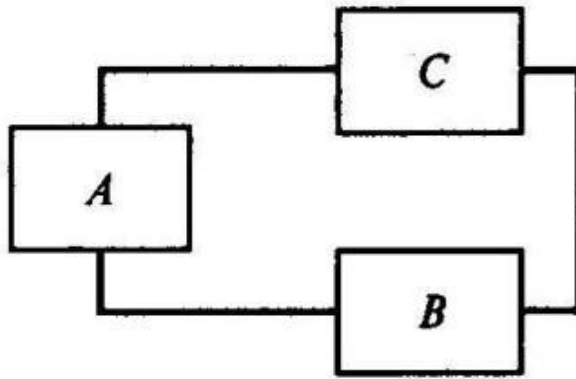


Рисунок 9.1 – Схема взаємодії ланок комплексу

Визначимо А як подію, яка полягає в тому, що ланка А працює безвідмовно, $\bar{A}$ – ланка відмовила. Аналогічні визначення введемо для ланок В і С. При припущенні про незалежність відмов розрахуємо ймовірності для кожного з способів їх появи. Так, $P(ABC) = P(A)P(B)P(C)$. Для наочності приймемо числові значення $P(A) = 0,95$; $P(B) = 0,9$; $P(C) = 0,85$. Результати розрахунків запишемо в таблицю 9.4.

Таблиця 9.4 – Ймовірна оцінка станів ланок комплексу

Число відмов	Стан комплексу і їх ймовірності		Ймовірність безвідмовної роботи комплексу
0	ABC	$0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,85$	0,7268
1	$AB\bar{C}$	$0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,15$	0,1283
1	$A\bar{B}C$	$0,95 \cdot 0,1 \cdot 0,85$	0,0808
1	$\bar{A}BC$	$0,05 \cdot 0,9 \cdot 0,85$	0,0383
2	$A\bar{B}\bar{C}$	$0,95 \cdot 0,1 \cdot 0,15$	0,0142
2	$\bar{A}B\bar{C}$	$0,05 \cdot 0,9 \cdot 0,15$	0,0068
2	$\bar{A}\bar{B}C$	$0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,85$	0,0042
3	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$	$0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,15$	0,0008

Наприклад, якщо відмову викликають тільки події $AB\bar{C}$, $A\bar{B}\bar{C}$, $\bar{A}\bar{B}\bar{C}$, то ймовірність відмови комплексу дорівнює $0,1283 + 0,0142 + 0,0008 = 0,1433$.

Цей метод дозволяє враховувати вплив на комплекс кожного способу появи відмов.

Розрахунки, виконані по викладеній методиці, дозволяють визначити необхідність ремонтно-технічних дій і обґрунтувати вимоги до резервування машин комплексу.

Обґрунтування рівня надійності технологічного комплексу і його ланок. Рівень надійності комплексу в значному ступеню визначає ефективність його застосування. При оптимізації рівня надійності необхідно враховувати зміну експлуатаційних і технічних характеристик в різних умовах.

Підтримання машин в працездатному стані здійснюється: 1) введенням деякої надлишковості окремих машин; 2) організацією ремонтно-технічних дій; комплектуванням комплексів високонадійною технікою; 4) сполученням перелічених засобів експлуатації. В комплексі визначаючою ланкою звичайно є ланка, що виконує основну технологічну операцію. Для цієї

ланки ймовірність виконання завдання можна визначити з виразу

$$p = 1 - (1 - P_i p_i)^N,$$

де p_i - ймовірність виконання завдання i -м агрегатом; P_i – показник надійності i -го агрегату.

Число агрегатів в основній ланці розраховують по формулі

$$N = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-P_i p_i)}.$$

Визначивши вимоги до надійності основної ланки комплексу, встановлюють вимоги до надійності інших ланок.

Припустимо незалежність появи відмов ланок комплексу. Взаємодія машин в окремих ланках представимо у вигляді модулів, що мають відповідне схемне з'єднання. Тоді інтенсивність відмов кожної ланки комплексу

$$\lambda_1 = N_i \frac{-\ln P_0(t)}{N w_i t_i}, \quad (9.16)$$

де N , N_i – загальне число агрегатів відповідно в комплексі і в i -й ланці; t , t_i - необхідна тривалість роботи (напрацювання) відповідно технологічного комплексу і i -ої ланки; $P_0(t)$ – необхідна ймовірність безвідмовної роботи технологічного комплексу при заданому напрацюванні t ; w_i – коефіцієнт важливості ланки, який можна представити як ймовірність відмови технологічного комплексу при відмові i -ої ланки.

Ймовірність безвідмовної роботи (надійність) i -ої ланки технологічного комплексу при необхідному напрацюванні t_i визначимо з виразу

$$P_i(t) = 1 - \frac{1 - [P(t)]^{N_i/N}}{w_i}. \quad (9.17)$$

Ця залежність може бути використана для визначення вимог до надійності кожної машини у всіх ланках комплексу, якщо прийняти відповідні значення вхідних величин для ланки, що розглядається.

Знаючи вимоги до ймовірності безвідмовної роботи ланки або машини P_i , інтенсивність відмов λ_i і число агрегатів N_i в i -й ланці, визначають допустимий час відновлення:

$$T_{vi} = (1 - P_i) \lambda_i N_i. \quad (9.18)$$

Якщо відмови комплексу з вини механізаторів ($K_{г.м}$), терміну технологічної ($K_{г.т}$) і ремонтно-технічної дії ($K_{г.р}$) призводять до одних і тих самих наслідків (невиконання задачі) і при цьому втрати, викликані появою відмови, однакові, то вимоги до показників надійності по вище наведеним причинам визначають з виразу

$$K_{г.м} = K_{г.р} = K_{г.т} = \sqrt[3]{P_{opt}}, \quad (9.19)$$

де P_{opt} – оптимальне значення узагальненого показника надійності комплексу.

Якщо вартість відмов по різних причинах різна, то для вирішення задачі показники економічності визначають безпосередньо через показники надійності, потім шукають оптимальне рішення по кожному показнику надійності.

Припустимо, що відмова першої групи складності приводить до втрат, які вимірюються величиною C_1 , відмова другої групи складності – до втрат, які вимірюються величиною C_2 , а третьої групи складності – до втрат C_3 . Якщо вимоги по надійності в узагальненому вигляді виражені залежністю $P_0 = P_1 P_2 P_3$, то втрати C відмов всього комплексу можна визначити по правилам обчислення математичних очікувань:

$$C = C_1(1 - P_1)P_2P_3 + C_2(1 - P_2)P_1P_3 + C_3(1 - P_3)P_1P_2. \quad (9.20)$$

Задача приводиться до знаходження умовного мінімуму величини C і вирішується методами Лагранжа. Для цього складемо функцію Лагранжа:

$$L = C_1(1 - P_1)P_2P_3 + C_2(1 - P_2)P_1P_3 + C_3(1 - P_3)P_1P_2 + QP_1P_2P_3.$$

Значення основних показників надійності, що мінімізують втрати, визначимо в результаті вирішення системи рівнянь

$$\frac{dL}{dP_1} = 0; \frac{dL}{dP_2} = 0; \frac{dL}{dP_3} = 0; P_0 = P_1P_2P_3,$$

звідки

$$P_1 = \sqrt[3]{\frac{C_2^2 P_0}{C_2 C_3}}; P_2 = \sqrt[3]{\frac{C_1^2 P_0}{C_1 C_3}}; P_3 = \sqrt[3]{\frac{C_3^2 P_0}{C_1 C_2}}. \quad (9.21)$$

Аналіз отриманих залежностей показує, що із збільшенням витрат на усунення відмов кожної групи складності неминуче повинні збільшуватися вимоги до надійності ремонтно-технічного обслуговування кожного елемента.

Виробнича ситуація. В господарстві в період весняної посівної кампанії за шість днів необхідно виконати роботи на площі 4000 га. Для виконання робіт організовано посівний комплекс. Склад і техніко-експлуатаційна характеристика машин комплексу наведені в таблиці 9.2. Необхідно проаналізувати і визначити експлуатаційну надійність (ймовірність безвідмовної роботи) агрегатів, ланок і всього комплексу. Роботу комплексу організувати поточно-циклічним методом в дві зміни.

Ймовірність безвідмовної роботи машин визначаємо за формулою (9.3) при $t \rightarrow \infty$:

для завантажувача зерна $P = K_r = 100/(100+4,2) = 0,96$;

протравлювача $94/(94+2,8) = 0,97$;

завантажувача сівалок $84/(84+4,5) = 0,95$;

завантажувача добрив $95/(95+2,5) = 0,97$;

подрібнювача 0,95; трактора МТЗ-80 0,94;

сівалок СЗ-3,6 і СЗУ-3,6 0,94; зчіпки 0,98; борони 0,99;

трактора ДТ-75М 0,93; трактора Т-150К 0,93.

Ймовірність безвідмовної роботи агрегатів розраховуємо за формулою (9.12):

МТЗ-80+СЗ-3,6++4БЗС-1

$P = K_r = 0,94 \cdot 0,94 \cdot 0,99^4 = 0,85$;

ДТ-75М+СП-11А+2СЗУ-3,6+7БЗС-1

$P = 0,93 \cdot 0,98 \cdot 0,94^2 \cdot 0,99^7 = 0,75$;

Т-150К+СП-16+3СЗ-3,6+10БЗС-1

$P = 0,93 \cdot 0,98 \cdot 0,94^3 \cdot 0,99^{10} = 0,68$.

Проаналізуємо експлуатаційну надійність посівного агрегату на базі трактора ДТ-75М. Частину часу, протягом якого знаходиться в працездатному стані, оцінюємо коефіцієнтом готовності (див. формулу (9.3)):

$$K_r = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{t_{ai}}{t_{pi}} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{5,5}{76} + \frac{0,8}{60} + 2 \frac{2,2}{38} + 7 \frac{0,4}{70} \right]^{-1} = 0,805.$$

Середню частину часу, протягом якого агрегат буде в стані відмови через кожний елемент, визначаємо з виразу

$$t_{ai} = K_r \frac{t_{ai}}{t_{pi}}.$$

Тоді частина часу простою агрегату через трактор $t_{bi} = 0,805 \cdot 5,5/76 = 0,058$; через зчіпку $t_{b,зч} = 0,805 \cdot 0,8/60 = 0,0107$; через сівалки $t_{b,с} = 0,805 \cdot 2 \cdot 2,2/38 = 0,0932$; через борони $t_{b,б} = 0,805 \cdot 7 \cdot 0,4/70 = 0,0322$.

Середній час безвідмовної роботи агрегату (див. формулу (9.5))

$$t_p = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{t_{pi}} \right)^{-1} = \left[\frac{1}{76} + \frac{1}{60} + \frac{2}{38} + \frac{7}{70} \right]^{-1} = 5,48 \text{ год.}$$

Середній час простою агрегату

$$\bar{t}_z = \bar{t}_p \sum_{i=1}^n \frac{t_{zi}}{t_{pi}} = 5,48 \left(\frac{5,5}{76} + \frac{0,8}{60} + 2 \frac{2,2}{38} + 7 \frac{0,4}{70} \right) = 1,33 \text{ год.}$$

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи ланок підготовки та транспортування насіння і добрив складемо технологічну схему взаємодії в ній машин (рис. 9.2).

Для ланки підготовки і транспортування насіння

$$P_{\text{лан}} = P_1 P_2 P_3 [1 - (1 - P_4)^2] = 0,96 \cdot 0,97 \cdot 0,97 [1 - (1 - 0,95)^2] = 0,894;$$

для ланки підготовки і транспортування добрив

$$P_{\text{лан}} = P_1 [1 - (1 - P_2)^2] [1 - (1 - P_3)^2] = \\ = 0,97 [1 - (1 - 0,95)^2] [1 - (1 - 0,95)^2] = 0,945;$$

для ланки підготовки полів

$$P_{\text{лан}} = P_1 P_2 P_3^4 = 0,94 \cdot 0,94 \cdot 0,99^4 = 0,84.$$

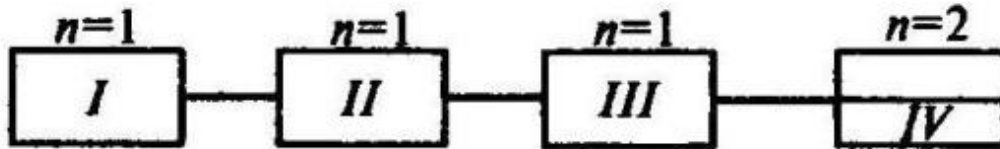


Рисунок 9.2 – Схема взаємодії машин в ланці підготовки і транспортування насіння
I...IV – машини в ланці; n – число машин

Ймовірність безвідмовної роботи першої посівної ланки визначимо у відповідності з її технологічною схемою взаємодії машин (рис. 9.3).

Ймовірності одночасної роботи в ланці від одного до шести агрегатів розраховуємо за формулою (9.10):

$$P_1 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} 0,75^1 (1 - 0,75)^5 = 0,0044;$$

$$P_2 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} 0,75^2 (1 - 0,75)^4 = 0,0329;$$

$$P_3 = 0,131; P_4 = 0,296; P_5 = 0,356; P_6 = 0,178.$$



Рисунок 9.3 – Схеми взаємодії машин і агрегатів в посівній ланці №1

I...IV – машини в агрегаті; n – число машин в агрегаті; m – число агрегатів в ланці

З розрахунків видно, що найбільш ймовірний стан посівної ланки №1, коли одночасно працюватимуть чотири або п'ять агрегатів з шести. В цьому випадку

$$P_{\text{№1}} = 1 - (1 - P_r)^{4,5} = 1 - (1 - 0,75)^{4,5} = 0,994.$$

Ймовірність безвідмовної роботи посівної ланки №2 також визначимо у відповідності з її технологічною схемою (рис. 9.4) за формулою (9.10)

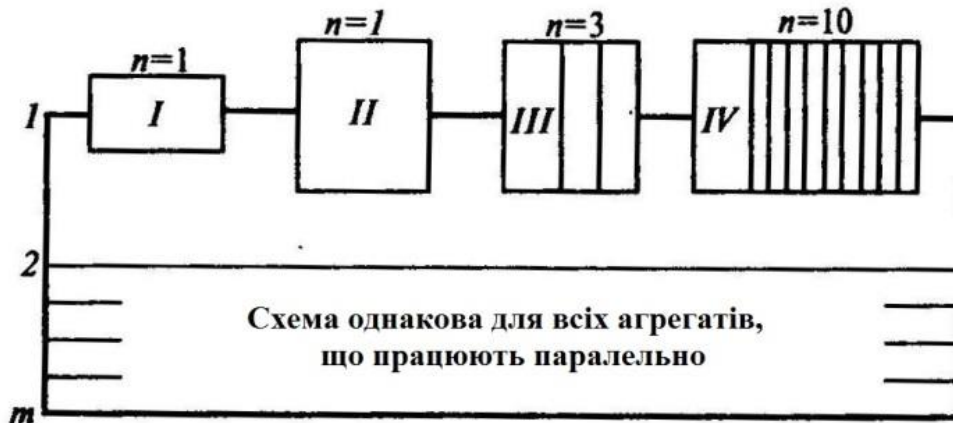


Рисунок 9.4 – Схеми взаємодії машин і агрегатів в посівній ланці №2

I...IV – машини в агрегаті; n – число машин в агрегаті; m – число агрегатів в ланці

$$P_1 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 1 \cdot 2} 0,68(1 - 0,68)^2 = 0,208;$$

$$P_2 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 1} 0,68^2(1 - 0,68)^1 = 0,443;$$

$$P_3 = 0,68^3 = 0,314.$$

Вочевидь, що ймовірність безвідмовної роботи посівної ланки №2 дорівнює добутку ймовірностей станів: $P_{\text{№2}} = P_1 + P_2 + P_3 = 0,208 + 0,443 + 0,314 = 0,965$.

Ймовірність безвідмовної роботи посівної ланки №3 визначаємо, отримуючи

$$P_{\text{№3}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0,011 + 0,098 + 0,368 + 0,522 = 0,999.$$

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи всього технологічного комплексу складемо структурну схему взаємодії ланок (рис.9.5) враховуючи всі взаємовиключаючі способи появи відмов.

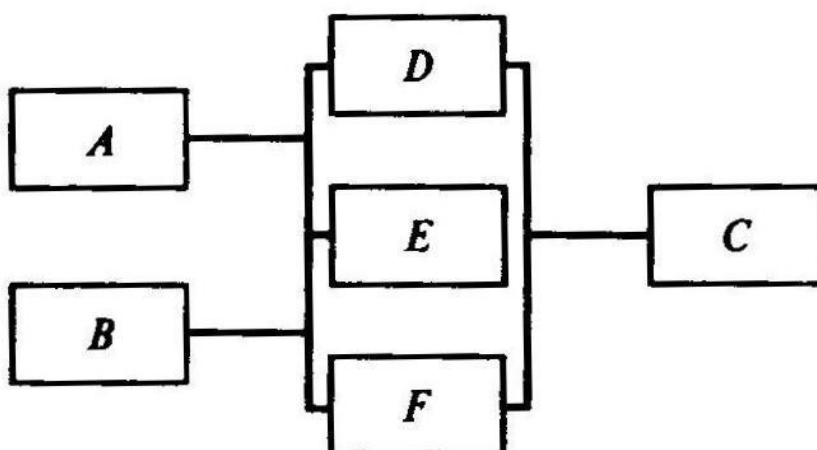


Рисунок 9.5 – Схема взаємодії ланок посівного комплексу

A – ланка підготовки і транспортування насіння; B – ланка підготовки і транспортування добрив; C – ланка підготовки полів; D, E, F – посівні ланки відповідно №1, №2, №3

Розглянемо шестиелементну систему А...F. Визначимо А як подію, тобто стан відмови. Введемо аналогічні визначення для ланок В...F. Ймовірності їх безвідмовної роботи приймемо з раніше виконаних розрахунків. Припускаючи незалежність відмов в ланках, обчислимо ймовірності для кожного способу появи відмов (табл. 9.5).

Таблиця 9.5 – Ймовірності станів безвідмовної роботи посівного комплексу

Число ланок, що відмовили	Стан ланок комплексу	Ймовірність станів	Добуток ймовірностей
0	A·B·C·D·E·F	0,894·0,945·0,85·0,994·0,965·0,999	0,6881
1	A·B·C·D·E· $\bar{F}$	0,894·0,945·0,85·0,994·0,965·0,001	0,0006
	A·B·C·D· $\bar{E}$ ·F	0,894·0,945·0,85·0,994·0,035·0,999	0,0237
	A·B·C· $\bar{D}$ ·E·F	0,894·0,945·0,85·0,006·0,965·0,999	0,0042
		$\sum P_i = 0,716 = 0,72$	

Припускаючи, що безвідмовність роботи комплексу в основному визначається паралельно працюючими посівними ланками, і враховуючи, що поява відмов в них – взаємно несумісні події, для отримання ймовірності безвідмовної роботи всього комплексу додаємо ймовірності станів його ланок.

Подальші розрахунки в таблиці припинені через малі значення отримуваних величин. З таблиці 9.5 видно, що ймовірність безвідмовної роботи комплексу з врахуванням можливих відмов посівних ланок слід очікувати на рівні 0,72.

Таким чином, технологічний комплекс, що розглядається, виконати завдання з ймовірністю 0,95 не може по технічним причинам. Для реалізації цієї умови необхідно визначити необхідну ВБР кожної ланки і агрегату комплексу.

Щоб забезпечити безвідмовну роботу всього комплексу з ймовірністю 0,95, розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи i-ї ланки при необхідному напрацюванні t_i за формулою (9.17).

$$P_A = 1 - [1 - (0,95)^{7/26}] = 0,986$$

Результати розрахунків для інших ланок зведені в таблицю 9.6.

Таблиця 9.6 – Обґрунтування вимог ймовірності безвідмовної роботи до ланок комплексу

Ланка	Число агрегатів в ланці N_i	Коефіцієнт важливості ланки	Ймовірність безвідмовної роботи	
			дійсна	необхідна
A	7	1	0,894	0,986
B	5	1	0,945	0,989
C	1	1	0,85	0,998
D	6	1	0,994	0,988
E	3	1	0,965	0,994
F	4	1	0,999	0,994
$N = \sum N_i = 26$				

З цієї таблиці видно, що безвідмовність ланок А, В, С, Е нижче необхідної. Надійність цих ланок необхідно підвищити за рахунок введення резервних або більш надійних машин.

Інтенсивність відмов кожної ланки комплексу визначимо з виразу (9.16), припускаючи при малих значеннях x величину $e^{-x} = 1 - x$.

Результати розрахунків систематизувати і представити у вигляді таблиці 1.4. Зробити висновки по кожному пункту розрахунків.

Практичне заняття №10

Забезпечення експлуатаційної надійності технологічних комплексів методами резервування

Мета роботи – опанувати методи резервування.

Рівень надійності комплексу визначається при його формуванні. На цьому етапі визначають структуру комплексу і витрати на його експлуатацію. При відсутності надійних агрегатів комплекси формують з тих, які є в господарстві, але в цих умовах необхідно розглядати і порівняти між собою способи резервування і прийняти найбільш прийнятний.

Зміст завдання.

1. Вибрати виробничу ситуацію з таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 - Варіанти завдання і характеристика ланок комплексу

Склад технологічного комплексу	Номер варіанту														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Число транспортних засобів при об'ємі робіт,год														
	3000					4000					5000				
Скошування в прокоси															
Т-150К+КПКУ- 75 Е-301 МТЗ-80+КРН- 2,4	4	-	-	4	-	-	4	-	-	5	-	-	5	-	-
	-	4	-	-	4	-	-	4	-	-	5	-	-	5	-
	-	-	4	-	-	4	-	-	4	-	-	5	-	-	5
Згрібання в валки															
МТЗ-80+ГВР-6	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
Підбирання з подрібненням															
ЯСК-200 «Ярославець» Е-281Ф «Марал» КСК-100А	4	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	4	4	4	4	4	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	5
Транспортування до місця закладки															
ЗИЛ-ММЗ-554 ГАЗ-САЗ-53Б МТЗ-80+ПИМ- 20	12	12	12	12	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	13	13	13	13	13	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14	14	14	14
Трамбування															
К-700	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

2. Вивчити теоретичні основи резервування.

3. Визначити число резервних агрегатів при резервуванні ланок дробною кратністю, забезпечивши ймовірність безвідмовної роботи технологічного комплексу на рівні 0,85 і мінімальні витрати протягом зміни.

4. Порівняти ефективність поелементного і загального резервування на прикладі використання комбайнів КСК-100А.

Загальні відомості.

Теоретичні основи резервування. Задачу оптимального резервування окремих елементів можна представити в наступному вигляді.

Є нерезерована система, що складається з N взаємно незалежних елементів, причому ймовірність їх відмов $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$, а вартості усунення відмов $C_1, C_2, \dots, C_n$. Є потреба так зарезервувати систему, щоб дотримувалась одна з умов: 1) ймовірність безвідмовної роботи була не нижче необхідної, а вартість мінімальною; 2) вартість системи не перебільшувала допустимого значення, а ймовірність безвідмовної роботи була максимальною.

З умови задачі видно, що вартість експлуатації резервованої системи C_c залежить від числа машин N_i , їх вартості C_i , кратності m і способу резервування, тобто $P_c(t) = f(C_i, N_i, m, \text{спосіб резервування})$.

Ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи також залежить від цих величин: $P_c(t) = f(P_i, N_i, m, \text{спосіб резервування})$.

Вочевидь, оптимізація резервування зводиться до знаходження таких значень $m > 1$ і такого способу резервування, при яких $C_c \rightarrow \min$ і $P_c(t) > P_{\text{доп}}$.

Кратність резервування i -ої машини обчислимо за формулою:

$$m_i = \frac{\ln(y + d_i) d_i}{\ln(1/q_i)}, \quad (10.1)$$

де q_i – ймовірність відмови i -ої машини; y, d_i – постійні величини.

Постійна

$$d_i = \frac{C_i}{\ln(1/q_i)}.$$

Значення y обчислимо з умови

$$P_{\text{тр}} = [\prod (y + d_i)]^{-1} y^N, \quad (10.2)$$

де $P_{\text{тр}}$ – необхідна ймовірність безвідмовної роботи.

З достатньою точністю отримаємо

$$y = \frac{P_{\text{тр}} \sum d_i}{1 - P_{\text{тр}}}. \quad (10.3)$$

При вирішенні зворотної задачі значення y можна обчислити з рівняння

$$y = \frac{C_{\text{доп}} + \sum d_i \ln d_i}{\sum d_i}. \quad (10.4)$$

Рішення задачі доцільно виконати по алгоритму, наведеному в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2- Алгоритм розрахунку резервних елементів

Розрахункова формула	Машини в ланці або ланки в комплексі				
	1	2	3	...	N
P_i					
q_i					
C_i					
$1/q_i$					
$\ln(1/q_i)$					
$d_i = C_i / \ln(1/q_i)$					
$\sum d_i$					
$P_{\text{тр}} \sum d_i$					
$1 - P_{\text{тр}}$					
$y = \frac{P_{\text{тр}} \sum d_i}{1 - P_{\text{тр}}}$					
$y + d_i$					
$\ln(y + d_i)$					

$\frac{\ln(y+d_i)d_i}{\ln(y+d_i)}$	
$m_i = \frac{\ln(y+d_i)d_i}{\ln(1/q_i)}$	

Надійність ланок комплексу, резервованих дробною кратністю, визначають з виразу

$$P_m(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad (10.5)$$

де m – число резервних машин при загальній кількості N ; $\lambda_0 = N\lambda_i$ – інтенсивність відмов працюючих машин.

Для безперервного функціонування технологічного комплексу необхідно створити запас елементів, який забезпечить роботу комплексу протягом часу t з довірчою ймовірністю $P_c(t)$.

Якщо система складається з m резервних та n основних елементів із загального числа елементів N , то система відмовить при використанні основних і резервних елементів.

При необхідній $P_c(t)$ число резервних елементів

$$m = \left\lceil \frac{2t_n N / t_e}{\sqrt{(Av)^2 + 4t_n N / (t_n - Av)}} \right\rceil^2 - N, \quad (10.6)$$

де A – табульована величина.

З виразу (10.6) видно, що на забезпечення роботи системи із заданою довірчою ймовірністю оказують вплив проєктований і фактичний терміни експлуатації машин (t_n , t_e), число машин в групі (N), в яких використано резервний елемент, і коефіцієнт варіації $v = \sigma / t_e$ (тут σ – середнє квадратичне відхилення часу). Із збільшенням коефіцієнту варіації необхідність в резервних елементах збільшується, а питома необхідність резервних елементів із збільшенням N знижується.

При резервуванні заміщенням максимізують готовність технологічного комплексу з K ланок, кожна з яких містить N_i паралельно працюючих машин вартістю C_i і готовністю P_{ri} . Технологічний комплекс ефективно функціонує при витратах ресурсів S видів: $S = 1, 2, \dots, L$. Працездатність комплексу зберігається, якщо в кожній ланці працездатна хоча б одна машина.

Необхідно відшукати такий оптимальний набір машин $N_1, N_2, \dots, N_i$, для якого максимальна готовність може бути досягнута при заданих витратах, тобто

$$\sum_{i=1}^m P_r(N_i) \rightarrow \max \text{ при } \sum_{i=1}^m C_i(N_i) \leq C_{\text{доп}}. \quad (10.7)$$

Використовуючи узагальнений метод Лагранжа, отримаємо рішення при фіксованому $L > 0$ по цілим N_i за рахунок максимізації функції для кожної ланки комплексу окремо.

$$P_{ri}(N) = \ln[1 - (1 - P_{ri})^N] - LC_i N_i \rightarrow \max. \quad (10.8)$$

Після диференціювання і перетворення отримаємо

$$N_i = \frac{\ln \left[\frac{LC_i}{LC_i - \ln(1 - P_{ri})} \right]}{\ln(1 - P_{ri})}. \quad (10.9)$$

Для кожної ланки обчислюють значення N_i і досліджують найближчі цілі числа N_{i-1} і N_{i+1} , вибираючи ті з них, при яких готовність P_{ri} найбільша. Далі додають вартості вибраних машин N_i . Цей процес повторюють для послідовних значень L , отримуючи послідовність оптимальних рішень.

Якщо в ланці з N паралельно працюючих однотипних агрегатів виникають різні відмови, то характер відмов також необхідно враховувати. Нехай ймовірність відмови одного агрегату першого виду q_1 , а другого виду – q_2 . При цьому виконується умова $P(t) + q_1(t) + q_2(t) = 1$. Тоді показник надійності

$$P_i(t) = [P(t) + q_1(t)]^N = [1 - q_2(t)]^N - q_1(t).$$

Функція $P_1(t)$ має максимум при

$$N_1 = \frac{\ln[\beta q_2(t)]}{\ln[1-q_2(t)]} / \ln \frac{1-q_2(t)}{\beta q_2(t)}, \quad (10.10)$$

де $\beta = q_1(t)/q_2(t)$.

Ці результати не залежать від виду закону розподілення часу безвідмовної роботи і можуть бути використані для оптимізації резерву в складних технологічних комплексах.

Для забезпечення заданого рівня надійності технологічного комплексу резервуванням використаємо метод домінуючих послідовностей. Дослідимо роботу технологічного комплексу заготовки подрібнених кормів, який складається з чотирьох ланок. Вихідні дані для рішення задачі вказані в таблиці 10.3.

Ймовірність безвідмовної роботи ланки визначимо за формулою

$$P_s = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_0 t), \quad (10.11)$$

де n – число машин в ланці; λ_0 – інтенсивність відмов агрегату; t – тривалість експлуатації.

Таблиця 10.3 – Техніко-економічна характеристика машин комплексу

Призначення ланок (машин) комплексів	Номер ланки	Число машин	Готовність			Вартість, грн/год	
			Машини за 100 год експлуатації	Ланки на початок експлуатації	Ланки через 10 год експлуатації	машини	ланки
Скошування	1	4	0,86	0,993	0,941	7,30	29,20
Підбирання з подрібненням	2	6	0,91	0,994	0,994	23,20	139,20
Транспортування	3	10	0,92	0,991	0,920	3,70	37,20
Трамбування	4	2	0,94	0,998	0,987	12,30	24,60

Надійність ланки при резервуванні заміщенням

$$P_{\text{лан}} = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_0 t) \left(1 + \lambda_0 t + \frac{(\lambda_0 t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda_0 t)^x}{m!} \right), \quad (10.12)$$

де $x = 1 \dots m$ – число резервних агрегатів.

Використовуючи дані таблиці 10.2, знаходимо готовність комплекту на початок експлуатації, що дорівнює 0,976, а через годин роботи її слід очікувати на рівні 0,807 при витратах 230 грн. за 1 год. Встановимо рівень готовності на 10 годин від початку роботи 0,85. Число резервних машин в кожній ланці комплексу орієнтовно визначимо по формулі (10.1). По попереднім розрахункам максимальне число резервних машин для кожної з ланки дорівнює двом.

Побудуємо матрицю обґрунтування числа резервних машин в ланках 1 і 2 (табл.10.4). Стовпчики і строки матриці включають основні і резервні машини ланок. В кожній клітинці таблиці міститься по вертикалі: число машин, готовність, вартість 1 год експлуатації. Щоб вибрати найкращий варіант резервування, будуємо таблицю домінуючих послідовностей готовності (табл. 10.5).

Таблиця 10.4 – Матриця оцінки ефективності резервування машин в ланках 1 і 2

Число машин (основних + резервних), готовність, вартість 1 год експлуатації ланки 1	Число машин (основних + резервних), готовність, вартість 1 год експлуатації ланки 2		
	6+0	6+1	6+2
	0,944 130,2	0,954 164,2	0,961 185,6
4+0 0,941 29,2	0; 0 0,889 168,4	0; 1 0,897 193,4	0; 2 0,904 214,8
4+1 0,965 36,5	1; 0 0,901 175,7	1; 1 0,910 200,7	1; 2 0,916 221,1

4+2 0,995 43,8	2; 0 0,910 183,0	2; 1 0,920 208,8	2; 2 0,927 229,4
----------------------	------------------------	------------------------	------------------------

Таблиця 10.5 – Домінуюча послідовність для ланок 1 і 2 при $P_T \geq 0,9$

Число машин в ланках		Готовність	Вартість
1	2		
4+1	6+0	0,901	175,7
4+0	6+2	0,904	214,8
4+2	6+0	0,910	183,0
4+1	6+1	0,910	200,7
4+1	6+2	0,916	221,1
4+2	6+1	0,920	208,0
4+2	6+2	0,927	229,4

Таблиця 10.6 – Матриця оцінки ефективності резервування машин в ланках 3 і 4

Число машин (основних + резервних), готовність, вартість 1 год експлуатації ланки 3	Число машин (основних + резервних), готовність, вартість 1 год експлуатації ланки 4		
	2+0	2+1	2+2
	24,60 0,987	36,90 0,993	49,20 0,996
10+0 37,0 0,920	0; 0 61,60 0,908	0; 1 73,90 0,913	0; 2 86,20 0,915
10+1 40,70 0,928	1; 0 65,30 0,916	1; 1 77,60 0,921	1; 2 89,90 0,924
10+2 44,40 0,934	2; 0 69,00 0,922	2; 1 81,30 0,927	2; 2 93,60 0,930

Таблиця 10.7 – Домінуюча послідовність для ланок 3 і 4

Число машин в ланках		Готовність	Вартість, грн/год
1	2		
10+0	2+0	0,908	61,6
10+0	2+1	0,913	73,9
10+0	2+2	0,915	86,2
10+1	2+0	0,916	65,3
10+1	2+1	0,921	77,6
10+2	2+0	0,922	69
10+1	2+2	0,924	89,9
10+2	2+1	0,927	81,3
10+2	2+2	0,930	93,6

Таблиця 10.8 - Домінуюча послідовність оцінки ефективності резервування ланок комплексу

Готовність	0,915	0,916	0,921	0,922	0,927	0,930
Вартість	86,20	65,30	77,60	69,00	81,30	93,60
0,910 200,7						0,846 294,3
0,916 221,1					0,849 302,4	0,851 314,7
0,920			0,847	0,848	0,852	0,856

208,0			285,6	277,0	289,3	301,8
0,927	0,848	0,849	0,853	0,856	0,859	0,862
229,4	315,6	294,7	307,0	298,6	310,7	323,0

Примітка. Незаповнені клітинки позначають, що готовність суміжних ланок менше необхідної.

Таблиця 10.9 – Домінуюча послідовність ланок комплексу при готовності $P > 0,85$

Число машин в ланках				Готовність	Сумарна вартість, грн.
1	2	3	4		
4+2	6+2	10+2	2+2	0,851	314,7
4+2	6+1	10+2	2+1	0,852	289,3
4+2	6+2	10+1	2+1	0,853	307
4+2	6+2	10+2	2+0	0,856	298,7
4+2	6+1	10+2	2+2	0,856	301,6
4+2	6+2	10+2	2+1	0,859	310,7
4+2	6+2	10+2	2+2	0,862	323

З таблиці 10.9 видно, що отримати готовність комплексу $P_r = 0,85$ можна при мінімальних витратах 289,3 грн/год.

Порівняння способів резервування обмінними агрегатами або окремими елементами розглянемо на прикладі.

Встановлено, що кормозбиральні комбайни Е-281 мали інтенсивність відмов складальних одиниць і агрегатів, наведену в таблиці 10.10.

Таблиця 10.10 – Показники надійності складальних одиниць і агрегатів комбайну

Складальні одиниці і агрегати	Інтенсивність відмов	Коефіцієнти готовності
Двигун	0,0158	0,984
Підбиральник	0,0330	0,986
Ходова частина	0,0146	0,986
Подрібнюючий пристрій	0,0242	0,976
Коробка передач	0,0034	0,996
Органи керування	0,0019	0,998
Всього по комбайну	0,0929	0,911

Ймовірність безвідмовної роботи ланки підбору і подрібнення, що складається з шести комбайнів, за 10 год роботи визначимо з виразу

$$P_g = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_0 t) = \exp(-\sum_1^6 0,0929 \cdot 10) = 0,945.$$

При резервуванні ланки заміщенням повнокомплектним комбайном ймовірність безвідмовної роботи

$$P_{p,z} = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_0 t)(1 + \lambda_0 t) = 0,945(1 + 0,0929) = 0,954.$$

Середнє напрацювання до першої відмови

$$T_{cp} = \frac{n}{\ln P_{p,z}} = \frac{6}{0,04709} = 127,4 \text{ год.}$$

Якщо в резерві є окремі обмінні вузли по одному комплекту, то ймовірність безвідмовної роботи комбайну

$$P_k = [\exp(-\lambda_1 t)(1 + \lambda_1 t)[\exp(-\lambda_2 t)(1 + \lambda_2 t))] \dots [\exp(-\lambda_6 t)(1 + \lambda_6 t)]$$

або

$$P_k = 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,999 = 0,994.$$

Інтенсивність відмов комбайну складе $\lambda = \ln P_k / t = 0,0006 \text{ год}^{-1}$. Ймовірність відмови технологічної ланки буде 0,996, середнє напрацювання на відмову збільшиться до 277,7 год.

Як видно з розрахунків, наявність в резерві одного повнокомплектного комбайну збільшує ймовірність безвідмовної роботи технологічної ланки на 0,009, а за рахунок окремих агрегатів і складальних одиниць надійність можна збільшити на 0,051.

Питання застосування повнокомплектного або по елементного резервування в кожному конкретному випадку повинен вирішувати спеціаліст з врахуванням особливостей експлуатації. В господарстві доцільно створювати резерв обмінних агрегатів або окремих деталей. Це дозволить оперативно усувати відмови, що виникають при роботі комплексів. Але при виконанні робіт в стиснуті агротехнічні терміни може виявитися ефективним і повнокомплектне резервування.

Виробнича ситуація. В господарстві для заготовки сінажу організовано комплекс машин. Планований термін збирання 6 діб. Тривалість робочого дня в період збирання 14 годин.

Ймовірність погодних умов 0,9. Сінаж слід заготовлювати по технологічній схемі і в об'ємі, які вказані в таблиці 10.1.

Для розрахунку експлуатаційної надійності комплексу, вибраного у відповідності з варіантом завдання, і забезпечення необхідної надійності методами резервування слід використовувати дані таблиць 10.11 та 10.12.

Таблиця 10.11 – Техніко-економічні характеристики машин комплексу

Марка машини	Балансова вартість	Річне завантаження, год	Напрацювання на відмову, год	Середній час усунення відмови, год
К-700А		1300	84	6,2
Т-150К		1300	82	5,6
МТЗ-80		1200	86	4,8
ГАЗ-САЗ-53Б		1800	140	3,8
ЗИЛ-ММЗ-554		1800	150	3,6
КПКУ-75		280	24	4,5
Е-281Ф		200	36	5,3
КСК-100А		170	18	5,5
ЯСК-200		200	42	5,0
КРН-2,4		200	40	2,3
ГВР-6		140	20	1,5
ПІМ-20		500	260	4,3

Таблиця 10.12 – Показники надійності кормозбирального комбайну КСК-100А в умовах експлуатації

Комплектність машини і найменування складальних одиниць	Показники надійності		Розподілення відмов по групам складності, %		
	Напрацювання на відмову, год	Час відновлення, год	1	2	3
Комбайн з жаткою	24,35	5,715	43	32	25
Комбайн з підборщиком	27,20	6,30	42	34	24
Ріжучий апарат жатки	1,39	0,38	90	34	24
Привод ріжучого апарату	30,05	2,91	-	96	4
Підборщик	25,7	1,58	3,5	96,5	-
Апарат живлення	174	4,45	36	52	12
Подрібнюючий апарат	42,1	8,86	3	27	70
Ведучий міст з КЗП	254,6	15	16	7	77
Коробка передач апарата живлення	89,02	1,57	12	72	16

Результати розрахунків систематизувати і представити у вигляді таблиці 1.4. Зробити висновки по кожному пункту завдання.

Результати розрахунків систематизувати і представити у вигляді таблиці 1.4. Зробити висновки по кожному пункту розрахунків.

Практичне заняття №11

Вибір стратегій ремонтно-технічних дій для забезпечення надійної роботи технологічних комплексів

Мета роботи – вивчити методику розрахунку показників надійності технологічних комплексів при різних стратегіях технічного обслуговування ТО і визначити їх ефективність.

Зміст завдання.

2. Вивчити теоретичні основи обґрунтування стратегій ТО на ефективність роботи технологічного комплексу.
 2. Вибрати виробничу ситуацію з таблиці 10.1.
 3. Вибрати склад ланок технологічного комплексу.
 4. Визначити інтенсивність відмов ланок і всього ТК.
 5. Розрахувати середні періодичність і тривалість ТО агрегатів комплексу, а також коефіцієнт оперативної готовності ($K_{o.g}$) через 1, 2, 3 та годин експлуатації. Побудувати графік зміни $K_{o.g}$ по часу.
 6. Визначити ефективність стратегії 1 (періодичне ТО) в порівнянні зі стратегією 0 (без обслуговування) та знайти гранично ефективне значення періодичності.
 7. Обчислити середній час простою, інтенсивність відновлення і коефіцієнт оперативної готовності технологічного комплексу. Оцінити вплив введення посту технічного обслуговування і ремонту ТОР на ефективність роботи комплексу при випадковому часу обслуговування.
 8. Визначити ефективність потоків відмов і відновлень польових агрегатів, коефіцієнт оперативної готовності при комбінованому обслуговуванні і ефективність цієї стратегії (3) в порівнянні з періодичною (2) і випадковою (1) стратегіями.
 9. Оцінити ефективність резервування при проведенні ТО і відновленні технологічного комплексу.
- Обґрунтувати вибір стратегії ТО на період роботи технологічного комплексу та вказати заходи, що сприяють підвищенню показників його надійності.

Загальні відомості.

Теоретичні основи обґрунтування стратегій ТОР технологічних комплексів. В процесі експлуатації технічних засобів протікають зміни їх параметрів внаслідок фізико-хімічних змін в елементах (складальних одиницях і деталях), і при досягненні граничного значення параметру виникає відмова. При організації ТО повинна бути вибрана система правил і способів керування технічним станом агрегатів – стратегія, яка може бути встановлена як по напрацюванню, так і по стану.

Ефективність експлуатаційного забезпечення технологічних комплексів і системи їх ТО слід оцінити критерію, що враховує залежності між характеристиками агрегатів, системи ТО і технологічних комплексів. Через різноманітність зв'язків між цими характеристиками аналітичний вираз такого критерію громіздкий і складний для аналізу. Тому вплив системи ТО на характеристики технологічних комплексів оцінимо за допомогою окремих критеріїв – коефіцієнтів технічної ефективності і ефективності запобігання відмовам.

Коефіцієнт технічної ефективності

$$R_{г.е} = \frac{P_n - P_k}{P_k} = \frac{P_n}{P_k} - 1, \quad (11.1)$$

де P_n , P_k – значення показника надійності проектної та вихідної стратегії ТО.

Коефіцієнт ефективності запобігання відмовам

$$R_{r.o} = t_{o6}/t_0,$$

де t_{o6} , t_0 – середній час безвідмовної роботи технологічного комплексу, відповідно того, що обслуговується даною системою ТО і того, що не обслуговується.

Щоб забезпечити надійність комплексу, що розглядається, за рахунок застосування різних стратегій ТО, необхідно знати характеристики кожної стратегії, що ґрунтується на обчисленні показників надійності.

При організації експлуатації спочатку оцінюють різні види ТО нерезервованого комплексу і вибирають найбільш ефективний з них. Якщо вибраний спосіб ремонтно-технічних дій не забезпечує необхідного рівня надійності, то вводять резервування.

В якості показника надійності розглянемо коефіцієнт оперативної готовності і по показнику технічної ефективності або питомих витрат виберемо найкращу стратегію обслуговування.

Стратегія 0 – без обслуговування технологічного комплексу в період виконання польових робіт.

Коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r0} = [1 - \exp(-\lambda_0 t_e)] / \lambda_0 t_e, \quad (11.2)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов технологічного комплексу (див. завдання 10); t_e – тривалість експлуатації комплексу.

Стратегія 1 – періодичне технічне обслуговування, що передбачає планову перевірку і відновлення (неплановий ремонт) всіх елементів комплексу, що відмовили. З моменту усунення відмови до початку відновлюваних робіт планують новий період для планового обслуговування. Далі весь процес повторюється.

В якості спрощеної залежності для коефіцієнту оперативної готовності можна прийняти

$$K_{o.r1} = [1 - \exp(-\lambda_0 t_n)] / [(t_n + t_e) \lambda_0]^{-1}, \quad (11.3)$$

де t_n – періодичність обслуговування; t_e – тривалість ремонтно-технічних дій, тобто відновлення.

Стратегія 2 – випадкова, тобто неплановий ремонт проводять після самостійного прояву відмови у випадкові моменти часу.

Відмова проявляється в середньому через час t_0 . Протягом $t_{oч}$ технічний пристрій (агрегат, ланка) простоює в непрацездатному стані.

Неплановий ремонт починається у випадковий момент часу і триває в середньому t_b . При цьому замінюють або ремонтують елемент, що відмовив, а також усувають наслідки відмов. Після ремонту весь процес функціонування техніки повторюється.

Технологічні комплекси, що експлуатуються по даним правилам, підлягають тільки неплановим відновлювальним роботам, пов'язаним з появою відмов. Для даної стратегії ТОР коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r2} = \frac{1}{(\lambda_0 + \mu) t_e} \left\{ \frac{\mu}{\lambda_0} [1 - \exp(-\lambda_0 t_e)] + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu} [1 - \exp(-\lambda_0 + \mu t_e)] \right\}, \quad (11.4)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов; μ – інтенсивність відновлення; t_e – час експлуатації комплексу.

Якщо відмови виникають миттєво, то середній час вияву скритої відмови приймають $t_c = 0$. Якщо відмова самостійно не проявляється ($t_c = \infty$), то такі машини експлуатувати по даній стратегії неможна, так як в цьому випадку $K_r = K_{o.r} = 0$.

Стратегія 3 – комбіноване обслуговування, яке передбачає виконання наступних робіт:

- 1) через проміжок часу t_n за час t_b проводять періодичне ТО всіх ланок комплексу;
- 2) в процесі експлуатації контролюють справність деяких елементів таким чином, що контролем охоплюється потік відмов $\lambda_1 = \delta \lambda$ із загального потоку λ ;
- 3) при виявленні відмов контрольованих елементів відновлюють їх працездатність з інтенсивністю μ .

Коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r2} = \frac{1}{t_n + t_g} = \left\{ \frac{\mu[1 - \exp(-1 - \delta)\lambda t_n]}{(1 - \delta)\lambda(\delta\lambda - \mu)} + \frac{\delta\lambda[1 + \exp(-(\lambda + \mu)t_n)]}{(\delta\lambda + \mu(\lambda + \mu))} \right\}. \quad (11.5)$$

Ефективність стратегії 3 порівняно зі стратегією 1 або 2 визначають з виразу

$$R_{3/1} = \frac{K_{o.3}}{K_{o.1}} - 1; \quad R_{3/2} = \frac{K_{o.3}}{K_{o.2}} - 1. \quad (11.6)$$

Для випадкової стратегії інтенсивність обслуговування на базі нормативних даних може бути визначена з виразу

$$\mu_n = \lambda[1 - \exp(-\lambda t_n)][\exp(-\lambda t_n) - (1 - \lambda t_n) + \lambda t_g]^{-1}. \quad (11.7)$$

Слід мати на увазі, що μ_n визначає межу застосування конкретної стратегії ТО. Якщо $\mu > \mu_n$, то високі показники надійності забезпечу обслуговування з випадковим періодом. В іншому випадку більш переважним є періодичне ТО.

Стратегія 4 – профілактичне обслуговування з введенням резервних елементів.

Коли забезпечення заданого рівня надійності системою ТО недостатньо, застосовують резервування елементів комплексу. Для стратегії ТО з резервуванням і з перевіркою всіх елементів комплексу можна визначити його працездатність, якщо вона забезпечується справною роботою хоча б одного елемента, за формулою

$$P_n(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - \exp(-\lambda_i t)]. \quad (11.8)$$

Для комплексів, працездатність яких визначається справною роботою не менше x елементів, при $P_i = P_j = P$, $j = N - i$ – ймовірність безвідмовної роботи

$$P_n(t) = \sum_{j=0}^x C_N^j P^{N-j} (1 - P)^j. \quad (11.9)$$

Припустимо, що комплекс складається з N резервованих ланок і в процесі ТО перевіряють всі елементи. Тоді при $\lambda_i = \lambda_j$ коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r} = \frac{1}{t_n + t_g} \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \frac{C_N^j}{j\lambda} [1 - \exp(-j\lambda t_n)]. \quad (11.10)$$

При $N = 1$

$$K_{o.4} = [1 - \exp(-\lambda t_n)][\lambda(t_n + t_g)]^{-1}.$$

При стратегії ТО по стану з контролем параметрів з періодичністю t_n передбачене діагностування працездатності на протязі часу $t_d < t_{TO}$. При виявленні відмови машину відновлюють. В цьому випадку коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r} = \frac{t_0 [1 - \exp(-\frac{t}{t_0})] \exp(-\frac{t_g}{t_0})}{t_g [1 - \exp(-\frac{t}{t_0})] + t_{TO} + t_d}, \quad (11.11)$$

де t_0 – напрацювання на відмову; t_{TO} – тривалість планового ТО і діагностування.

Якщо використовують іншу стратегію, тоді працездатність комплексу контролюють з періодичністю t_k , то при досягненні напрацювання t проводять ТО тривалістю t_{TO} і при виникненні відмови машину відновлюють (змішана стратегія). Тоді коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{o.r} = \frac{t_0 [1 - \exp(-\frac{t}{t_0})] \exp(-\frac{t_g}{t_0})}{t_g [1 - \exp(-\frac{t}{t_0})] t_{TO} \exp(-\frac{t}{t_0}) + (t_k + t_g) \left[\frac{1 - \exp(-\frac{t}{t_0})}{1 - \exp(-\frac{t_k}{t_0})} \right]}. \quad (11.12)$$

Коефіцієнт технічної ефективності розраховують за формулою (11.1). За допомогою цього критерію можна об'єктивно оцінити ефективність стратегії ТО.

При встановленні фактичного стану агрегату (справний або несправний) за допомогою

діагностування внаслідок прийняття помилкових рішень можливі наступні висновки про технічний стан агрегату (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 – Оцінка фактичного стану агрегату

Стан агрегату	Ймовірність стану	Рішення, прийняте по діагностуванню	Умовний ризик
Справний	P	Справний	C_d
		Несправний	$C_d + C_{TO}$
Несправний	q	Справний	$C_d + C_{пто}$
		Несправний	$C_d + C_{TO}$

В якості умовних ризиків прийняті витрати:

C_d – на визначення технічного стану машини (діагностування);

C_{TO} – на операції технічного обслуговування, що виконуються по результатам діагностування;

$C_{пто}$ – втрати внаслідок невиконання оперативної задачі, так як несправний агрегат працює з меншою продуктивністю.

Складові ризиків визначають в кожному конкретному випадку.

Середній умовний ризик

$$r_y = P[(1 - \alpha)C_d + \alpha(C_d + C_{TO})] + q[\beta(C_d + C_{пто}) + (1 - \beta)(C_d + C_{TO})]. \quad (11.13)$$

Враховуючи, що при планово-запобіжному обслуговуванні витрати однакові, то в якості критерію ефективності можна прийняти

$$R_{TO} = C_{TO} / r_y. \quad (11.14)$$

Отриманий критерій ефективності характеризує зв'язок між показниками надійності агрегату, показниками системи контролю і економічними факторами. Переваги стратегії по стану з контролем параметрів більш істотні, якщо об'єми визначені безпомилково, тобто $\alpha = \beta = 0$. Тоді

$$R_{TO} = \frac{C_{TO}}{C_d + qC_{TO}} = \left(\frac{C_d}{C_{TO}} + q \right)^{-1}. \quad (11.15)$$

Перевага стратегії ТО по стану збільшується при зниженні витрат, тобто при $C_d \leq C_{TO}$. В цьому випадку $R_{TO} = q^{-1}$. Отже, стратегія ТО по стану з контролем параметрів особливо ефективна при експлуатації високонадійних машин. В реальному процесі ТО дотримання умови $C_d = C_{TO}$ можливо при використанні ефективних засобів діагностики.

Порівнюючи R_{TO} , вибирають кращу стратегію для конкретних умов експлуатації технологічного комплексу, після чого оптимізують характеристики системи ТОР.

Виробнича ситуація. В господарстві для заготовки сінажу об'ємом 4000 т організовано комплексний загін. Планований термін збирання 8 днів. Тривалість робочого дня в період збирання 10 годин. Ймовірність погодних умов 0,8. Сінаж заготовляють по технологічній схемі і в об'ємі, які вказані в таблиці 10.1.

Необхідно вибрати стратегію ТОР для забезпечення ефективності роботи технологічного комплексу з врахуванням даних таблиці 11.2.

Таблиця 11.2 – Показники надійності машин, нормативи періодичності та трудомісткості ТОР

Марка машини	Напрацювання на відмову, год	Середній час усунення відмови, год	ЩТО		ТО-1		ТО-2	
			Періодичність, мото-год	Трудомісткість, люд-год	Періодичність, мото-	Трудомісткість, люд-год	Періодичність, мото-	Трудомісткість, люд-

		год			год		год	год
К-700А	84	6,2	7	1,2	125	2,5	500	10,6
Т-150К	82	5,6	7	0,3	125	1,9	500	6,8
МТЗ-80	86	4,8	7	0,5	125	2,7	500	6,9
ГАЗ-САЗ-53Б	140	3,8	7	0,6	125	2,9	240	11,8
ЗИЛ-ММЗ-554	150	3,6	7	0,6	60	3	240	12
КПКУ-75	24	4,5	7	0,4	60	3,6	240	7,2
Е-281Ф	36	5,3	7	0,5	60	4	240	7,6
КСК-100А	18	5,5	7	0,7	60	4	240	7,6
ЯСК-200	42	5	7	0,7	60	4	240	7,6
КРН-2,4	40	2,3	7	0,15	60	2	-	-
ГВР-6	20	1,5	7	0,15	60	2,5	-	-
ПИМ-20	260	4,3	7	0,15	60	2	-	-

Склад комплексного загону наступний (в дужках вказано число агрегатів, машин):

ланка скошування

Т-150К+КПКУ-75(1), Е-281Ф(1), КСК-100А(1);

ланка згрібання у валки

МТЗ-80+ГВР-6(3);

ланка підбору з подрібненням

Т-150К+КПКУ-75(2), Е-281Ф(1), КСК-100А(2);

транспортна ланка

ЗИЛ-ММЗ-554(4), ГАЗ-САЗ-53Б(4), МТЗ-80+ПСЕ-12,5(2);

ланка закладки сінажу в траншеї

К-700А(2).

Всього технічних засобів в комплексі:

Т-150К – 3,

К-700А – 2;

МТЗ-80 – 3;

Е-281Ф – 2;

КСК-100А – 3;

КПКУ-75 – 3;

ЗИЛ-ММЗ-554 – 4;

ГАЗ-САЗ-53Б – 4;

ГВР-6 – 3;

ПСЕ-12,5 – 2.

Стратегія 0. Інтенсивність відмов агрегатів і ланок комплексу визначимо за формулою

$$\lambda_0 = \sum_i^m \lambda_i n_i,$$

де m – число агрегатів в ланці; n_i – число машин i -го типу в агрегаті.

З врахуванням даних таблиці 11.2 знаходимо інтенсивність відмов:

ланка скошування

$$\lambda_{ск} = \frac{1}{82} + \frac{1}{24} + \frac{1}{36} + \frac{1}{18} = 0,137;$$

ланки згрібання у валки

$$\lambda_{св} = 3 \left(\frac{1}{86} + \frac{1}{20} \right) = 0,199;$$

ланки підбору з подрібненням

$$\lambda_{п.и} = 2 \left(\frac{1}{82} + \frac{1}{24} \right) + \frac{1}{36} + \frac{2}{18} = 0,247;$$

транспортної ланки

$$\lambda_{\tau} = \frac{44}{160} + \frac{4}{140} + \frac{2}{86} + \frac{2}{260} = 0,086;$$

ланки закладки сінажу в траншеї

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{2}{84} = 0,024.$$

Інтенсивність відмови технологічного комплексу

$$\lambda_0 = \sum \lambda_i = 0,137 + 0,199 + 0,274 + 0,086 + 0,024 = 0,693.$$

Середній час безвідмовної роботи технологічного комплексу $t_p = 1/0,693 = 1,44$ год.

Коефіцієнт оперативної роботи комплексу по стратегії 0 (без обслуговування) визначаємо за формулою (11.2): при $t = 1$ год $K_{o,r0} = (1 - e^{-0,693})/0,693 = 0,721$; при $t = 3$ год $K_{o,r0} = 0,421$; при $t = 7$ год $K_{o,r0} = 0,204$.

Стратегія 1. Середню періодичність 10 агрегатів комплексу визначаємо за формулою

$$t_{\pi} = (\sum n_i / t_{ni})^{-1},$$

де n_i – число машин, для яких планується обслуговування з i -ою періодичністю; t_{ni} – періодичність i -го обслуговування.

З врахуванням нормативів таблиці 11.2

$$t_{\pi} = \left(\frac{31}{7} + \frac{8}{125} + \frac{8}{500} + \frac{21}{60} + \frac{16}{240} \right)^{-1} = 0,193 \text{ год.}$$

Середня тривалість ТО

$$t_{TO} = t_{\pi} \sum_j^N \sum_i^m t_{TO1} n_i / t_{ni},$$

де m, N – число відповідно машин і ланок в комплексі; t_{TO1} – тривалість ТО-1.

З врахуванням даних таблиці 11.2

$$t_{TO} = \left(1,2 \cdot \frac{2}{7} + 2,5 \cdot \frac{2}{125} + 10,6 \cdot \frac{2}{500} + \dots + 0,15 \cdot \frac{2}{7} + 2 \cdot \frac{2}{60} \right) \cdot 0,193 = 0,793 \text{ год.}$$

Інтенсивність відмов технологічного комплексу в одиницю часу, що служить підставою для проведення ТО,

$$\lambda_{он} = \sum_1^n n_i / t_{ni} [1 + \sum_1^n t_{ni} n_i / t_{ni}]^{-1} = 5,18 / (1 + 4,112) = 1,01 \text{ год}^{-1}.$$

Коефіцієнт оперативної готовності при проведенні періодичних ТО для усунення відмов розраховуємо за формулою (11.3):

$$K_{o,r1} = [1 - \exp(-1,01 \cdot 0,193)] / [(0,193 + 0,793) 1,01] = 0,178.$$

Через 1 год від початку експлуатації $K_{o,r1} = 0,351$; через 3 год $K_{o,r1} = 0,248$; через 7 год $K_{o,r1} = 0,126$.

Вплив періодичності ТО на зміну коефіцієнту оперативної готовності показано на рисунку 11.1.

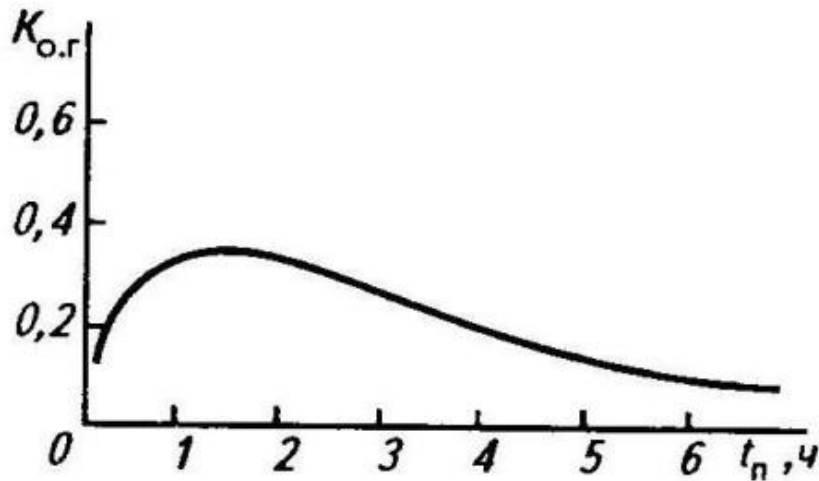


Рисунок 11.1 – Зміна коефіцієнту оперативної готовності в залежності від періодичності ТО

Ефективність стратегії 1 в порівнянні зі стратегією 0 визначаємо за формулою

$$R_{1/0} = \frac{[1 - \exp(-\lambda_0 t_n)] t_g / (t_n + t_g)}{1 - \exp(-\lambda_0 t_g)} - 1.$$

При проведенні профілактичних робіт через 1 год від початку експлуатації

$$R_{1/0} = \frac{[1 - \exp(-1,01 \cdot 7)] / (1 + 0,793)}{1 - \exp(-0,693 \cdot 7)} - 1 = 1,5;$$

через 3 год $R_{1/0} = 0,77$; через 7 год $R_{1/0} = -0,06$.

Зміна співвідношень ефективності стратегій 1 і 0 по часу показана на рисунку 11.2.

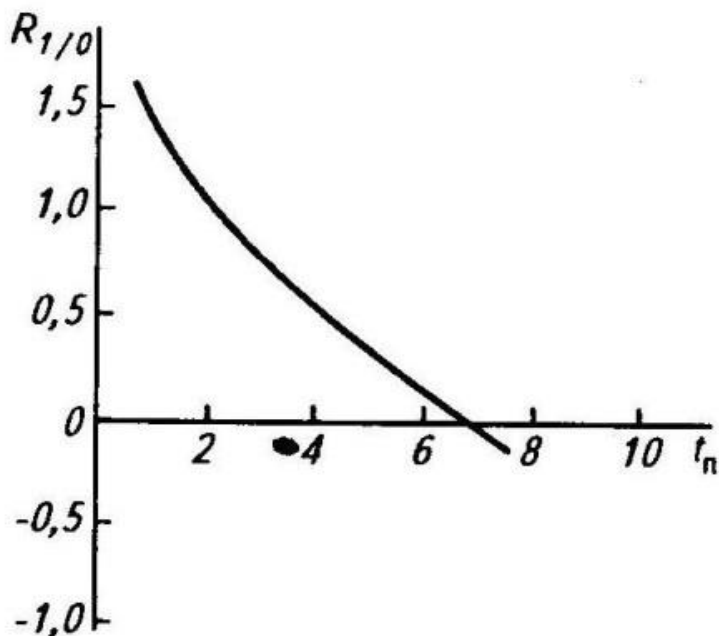


Рисунок 11.2 – Зміна коефіцієнту технічної ефективності в залежності від періодичності ТО

Стратегія 2. Середній час простою комплексу при проведенні ТОР розраховуємо з врахуванням даних таблиці 11.2:

$$t_{\Sigma} = t_p \sum \frac{t_{\Sigma} n_i}{t_{pi}} = 1,44(5,6 \cdot \frac{3}{82} + 4,5 \cdot \frac{3}{24} + 5,3 \cdot \frac{2}{36} + 5,5 \cdot \frac{3}{18} + 1,5 \cdot \frac{3}{20} + 3,6 \cdot \frac{4}{150} + 3,8 \cdot \frac{4}{140} + 4,8 \cdot \frac{2}{86} + 4,3 \cdot \frac{2}{260} + 6,6 \cdot 2/84) = 1,44 \cdot 2,867 = 4,13 \text{ год}$$

Інтенсивність відновлення елементів комплексу, що відмовили, при використанні одного ремонтного посту (або майстерні) $\mu_1 = \frac{1}{t_{\Sigma}} = \frac{1}{4,13} = 0,242$. При наявності двох ремонтних постів $\mu_2 = \frac{2}{4,13} = 0,484$.

Коефіцієнт оперативної готовності при випадковому часі обслуговування (стратегія 2) розрахуємо за формулою 11.4. При усуненні відмов однією ремонтною майстернею при $t_e = 1$ год.

$$K_{o,r2} = \frac{1}{(0,693 + 0,242) \cdot 1} \left\{ \frac{0,242}{0,693} [1 - \exp(-0,693 \cdot 1)] + \frac{0,693}{0,693 + 0,242} [1 - \exp((-0,693 + 0,242) \cdot 1)] \right\} = 0,67$$

При усуненні відмов двома ремонтними майстернями $K_{o,r} = 0,685$.

З розрахунків видно, що утворення додаткового посту сприяє збільшенню коефіцієнта оперативної готовності на 0,15. Ефективність стратегії 2 в порівнянні зі стратегією 1 при роботі одного посту

$$R_{2/1} = \frac{0,670}{0,351} - 1 = 0,9,$$

при роботі двох постів

$$R_{2/1} = \frac{0,685}{0,351} - 1 = 0,95.$$

Стратегія 3. Припускаємо, що через $t_n = 7$ год за час $t_{TO} = 0,793$ год проводиться періодичне ТО всіх машин комплексу. В процесі експлуатації контролюється справність польових агрегатів (скошування, згрібання, підбирання валків), інтенсивність відмов яких λ_1 із загального потоку відмов $\lambda_0 = 0,693$:

$$\lambda_1 = \sum \frac{n_i}{t_i} = 0,137 + 0,113 + 0,247 = 0,503.$$

Частина контрольованих відмов $\sigma = 0,503/0,693 = 0,725$.

При виявленні відмов агрегатів, що контролюються, їх працездатність відновлюють з інтенсивністю

$$\mu_k = \left[t_p \sum \frac{t_{\Sigma} n_i}{t_{pi}} \right]^{-1} = \left[1,44(5,6 \cdot \frac{3}{82} + 4,5 \cdot \frac{3}{24} + 5,3 \cdot \frac{2}{36} + 5,5 \cdot \frac{3}{18} + 4,8 \cdot \frac{3}{35} + 1,5 \cdot \frac{3}{20}) \right]^{-1} = 0,293.$$

При комбінованому обслуговуванні коефіцієнт оперативної готовності технологічного комплексу

$$K_{o,r3} = \frac{1}{7 + 0,793} = \left\{ \frac{0,293[1 - \exp(-1 - 0,725)0,693 \cdot 7]}{(1 - 0,725)0,693(0,725 \cdot 0,693 - 0,293)} + \frac{0,725[1 + \exp(-(0,693 + 0,293)7)]}{(0,725 \cdot 0,693 + 0,293)(0,693 + 0,293)} \right\} = 0,774.$$

При $\sigma = 1$ проведення ТО недоцільне.

Ефективність комбінованого обслуговування (стратегія 3) в порівнянні з періодичним (стратегія 1)

$$R_{3/1} = \frac{0,774}{0,351} - 1 = 1,2.$$

Ефективність стратегії 3 в порівнянні зі стратегією 2 (випадкове обслуговування) при роботі одного посту $R_{3/2} = \frac{0,774}{0,67} - 1 = 0,15$, при роботі двох постів $R_{3/2} = \frac{0,774}{0,685} - 1 = 0,12$.

Результати розрахунків по всім стратегіям ТОР необхідно оформити у вигляді таблиці 11.3.

Таблиця 11.3 – Зведена таблиця аналізу ефективності стратегій ТОР

Показник ефективності	Стратегії технічного обслуговування			
	0	1	2	3
Середній час безвідмовної роботи комплексу				
Інтенсивність відмов (обслуговувань)				
Середня тривалість ТО				
Інтенсивність проведення ТО				
Середній час відновлення				
Коефіцієнт оперативної готовності				
Коефіцієнт технічної ефективності				

Результати розрахунків систематизувати і оформити у вигляді таблиці 1.4. Зробити висновки по кожному пункту розрахунків.

Практичне заняття №12

Оптимізація характеристик системи технічного обслуговування і відновлення технологічних комплексів

Мета роботи – опанування методів оптимізації і набуття навичок обґрунтування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування (ТО) з метою відновлення і підвищення ефективності використання технологічних комплексів в період виконання польових робіт.

Зміст завдання.

1. Вибрати виробничу ситуацію з таблиці 10.1. Технічні характеристики машин і нормативні показники експлуатації машин з таблиці 11.2.
2. Вивчити теоретичні основи оптимізації технічних характеристик системи ТО₂ експлуатаційного ремонту і підвищення ефективності функціонального використання технологічних комплексів.
3. Визначити оптимальну частоту і періодичність операцій ТО оптимальну тривалість профілактичних робіт при максимальному коефіцієнті ефективності використання технологічного комплексу.
4. Обґрунтувати схему організації ремонтно-технічного обслуговування при максимальному коефіцієнті ефективності функціонального використання технологічного комплексу.

Загальні відомості.

Теоретичні основи оптимізації системи ТОР технологічних комплексів. У всіх операцій, передбачених правилами ТО сільськогосподарської техніки, повинні бути обґрунтовані періодичність і тривалість виконання. Періодичність контрольно-оглядових операцій встановлена по критерію максимальної ефективності використання агрегатів, що дорівнює добутку коефіцієнту технічного використання $K_{т.и}$ на ймовірність безвідмовної роботи в проміжках між обслуговуваннями $P(t_{пр})$:

$$R_{е.н} = K_{т.и} P(t_{пр}) = \left[1 + t_0/t_{п.к} + t_{с.в}/t_p \right]^{-1} \exp(-t_{п.к}/t_p) \rightarrow \max, \quad (12.1)$$

де t_0 – напрацювання на відмову; $t_{п.к}$ – періодичність профілактичного контролю; $t_{с.в}$ –

сумарний час простоїв при відновленні; t_p – час роботи агрегату.

В той же час

$$R_{\text{е.н}} = \exp \left[- (1 + t_{\text{в}}/m_{\text{к}}) \right] [1 + t_{\text{к}}m_{\text{к}} + t_{\text{в}}] - 1, \quad (12.2)$$

де $t_{\text{в}}$ – тривалість одного відновлення; $m_{\text{к}}$ – частота контрольно-оглядових операцій: $m_{\text{к}} = \frac{t_{\text{оп}} + t_{\text{в}}}{t_{\text{п.к}}} \approx \frac{t_{\text{с.п}}}{t_{\text{п}}}$; $t_{\text{оп}}$ – напрацювання на відмову комплексу, що обслуговується; $t_{\text{с.п}}$ – сумарний час простою на профілактиці; $t_{\text{п}}$ – тривалість однієї профілактики.

Витрати часу на забезпечення 1 год безвідмовної роботи при проведенні профілактичного контролю: $t_{\text{к}} = t_{\text{п}}/t_{\text{оп}}$.

Витрати часу на забезпечення 1 год безвідмовної роботи в результаті відновлення:

$$t_0 = t_{\text{в}}/t_{\text{оп}}.$$

Оптимальні частоту $m_{\text{к}}$ і періодичність $t_{\text{п.к}}$ контрольно-оглядових операцій визначимо, дослідивши вираз (12.2) на екстремум. Після диференціювання і перетворення цього виразу, отримаємо

$$t_{\text{к}}m_{\text{к}}^2 - t_{\text{к}}m_{\text{к}}(1 + t_{\text{в}}) - (1 + t_{\text{в}})^2 = 0,$$

Звідки оптимальна частота контрольно-оглядових операцій

$$m_{\text{к.опт}} = 0,5(1 + t_{\text{в}}) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{t_{\text{к}}}} \right) = 0,5(1 + t_{\text{в}}/t_{\text{оп}}) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4t_{\text{оп}}}{t_{\text{п}}}} \right), \quad (12.3)$$

оптимальна періодичність контрольно-оглядових операцій

$$t_{\text{п.к.опт}} = \frac{t_{\text{оп}} + t_{\text{в}}}{m_{\text{к.опт}}} = 2t_{\text{п}} / \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4t_{\text{оп}}}{t_{\text{п}}}} \right). \quad (12.4)$$

Найбільша ефективність використання агрегатів комплексу буде при частоті контролю $m_{\text{к.опт}}$, тобто при

$$R_{\text{е.н max}} = [1 + t_{\text{к}}(1 + t_{\text{в}})d + t_{\text{в}}] \exp[-(1/d)], \quad (12.5)$$

де $d = 1/2(1 + \sqrt{1 + 4t_{\text{к}}})$.

Ефективність використання агрегату технологічного комплексу визначається показниками надійності самих агрегатів ($t_{\text{оп}}$), середнім часом відновлення ($t_{\text{в}}$), характеристиками системи ТО ($t_{\text{пк}}$).

Оптимізацію періодичності регульовально-кріпильних операцій виконаємо, виходячи з наступних міркувань. До початку чергового технічного обслуговування необхідно визначити тривалість виконання вимог по надійності: $P_{\text{ф}} > [P_{\text{доп}}]$. В цьому випадку середній час безвідмовної роботи $t_0(t_p)$ при умові, що агрегат пропрацював деякий час t_p , буде характеризувати технічний ресурс, що залишився, який визначимо, виходячи з ймовірності безвідмовної роботи протягом часу $t_p + t$.

$$P(t_p + t) = P(t_p)P(t, t_p), \quad (12.6)$$

де $P(t_p)$ – ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t_p ; $P(t, t_p)$ – ймовірність безвідмовної роботи протягом часу $t_{\text{обсл}}$.

На підстав основного закону надійності

$$P(t, t_p) = \exp \left[\int_{t_p}^{t_p+t} \lambda(t) dt \right], \quad (12.7)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність потоку відмов.

Необхідний період t визначимо з умови $\int_{t_p}^{t_p+t} \lambda(t) dt = -\ln P_d$.

Періодичність регульовально-кріпильних операцій залежить від інтенсивності потоку відмов $\lambda(t)$. Якщо $\lambda(t) = \text{const}$, то

$$\int_{t_p}^{t_p+t} \lambda(t) dt = \lambda_o(t), -\ln P_d / \lambda_o. \quad (12.8)$$

Якщо $\lambda(t)$ представити у вигляді $\lambda_o(t) = \lambda_o + at$, то

$$\int_{t_p}^{t_p+t} [\lambda_o + at] dt = \left(\frac{a}{2}\right) t^2 + \lambda_o t + at_p. \quad (12.9)$$

Періодичність регульовально-кріпильних операцій визначаємо з рівняння $\left(\frac{a}{2}\right) t^2 + (\lambda_o + at_p)t + \ln P_d = 0$, вирішивши яке, отримаємо

$$t_{\text{опт}} = (\lambda_o + at_p) + \sqrt{[(\lambda_o + at_p)^2 - 2a \ln P_d] / a}. \quad (12.10)$$

Оптимальну періодичність профілактичних заміन елементів визначимо по критерію мінімуму витрат, що приходяться на 1 год роботи агрегату:

$$C_{\text{ч}} = \frac{C_{\text{п}} t_{\text{п}} + C_{\text{в}} N}{t_{\text{п.з}}} + \frac{Q(t_{\text{п.з}})(C_{\text{в}} t_{\text{в}} + C_{\text{Н}})}{t_{\text{п.з}}} \rightarrow \min, \quad (12.11)$$

де $C_{\text{п}}$, $C_{\text{в}}$ – вартість 1 год відповідно профілактичних і відновлюваних робіт; $C_{\text{Н}}$ – вартість елемента, що замінюється; N – число елементів; Q – ймовірність відмови за час $t_{\text{п.з}}$.

Ймовірність відмови агрегату за час $t_{\text{п.з}}$

$$Q(t_{\text{п.з}}) = 1 - [1 - q(t_{\text{п.з}})]^N. \quad (12.12)$$

Припускаючи, що $Q(t_{\text{п.з}}) = [q(t_{\text{п.з}})]^N$, витрати на 1 год роботи агрегату представимо у вигляді

$$C_{\text{ч}} = L_{\text{п}} N + L_{\text{в}} (t_{\text{п.з}})^{a_2} t_{\text{п.з}}^{-1}, \quad (12.13)$$

де $L_{\text{п}} = C_{\text{п}} t_{\text{п}} + C_{\text{Н}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на профілактичну заміну одного елемента; $L_{\text{в}} = a_1 (C_{\text{в}} t_{\text{в}} + C_{\text{Н}})$ – коефіцієнт, що характеризує витрати на усунення однієї відмови; a_1 , a_2 – емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнти a_1 і a_2 визначимо при апроксимації ймовірності відмови елементів комплексу експоненціальною функцією вигляду $q(t_{\text{п.з}}) = a_1 (t_{\text{п.з}})^{a_2}$.

Дослідивши залежність $C_{\text{ч}} = f(t_{\text{п.з}})$ на екстремум, визначимо проміжок часу між профілактичними замінами, що відповідає мінімальним витратам:

$$t_{\text{п.з}} = \sqrt[a_2]{L_{\text{п}} / [L_{\text{в}} (a_2 - 1)]}. \quad (12.14)$$

Якщо в процесі експлуатації протікає діагностування параметрів, то задача зводиться до обґрунтування періодичності вимірювань. По значенню параметра в момент вимірювання роблять висновок про необхідність регулювання або заміни елемента.

Тривалість профілактичних робіт – одна з важливих характеристик, що істотно впливає на ефективність використання технологічних комплексів.

Збільшення тривалості проведення ТО до номінального значення приводить до збільшення часу безвідмовної роботи внаслідок запобігання відмовам. З іншого боку, збільшення тривалості профілактичних робіт може зменшити готовність агрегатів і всього технологічного комплексу. Тому визначимо цей параметр виходячи з умови забезпечення заданої ефективності використання комплексу.

Критерій максимальної ефективності використання в загальному випадку визначають з виразу

$$R_{\text{е.н}} = \frac{t_p}{t_p + t_{\text{с.п}} + t_{\text{с.в}}} P(t), \quad (12.15)$$

де t_p – час перебування технологічного комплексу в працездатному стані; $t_{\text{с.п}} + t_{\text{с.в}}$ – сумарний час простою, витрачений на профілактику і відновлення; $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи комплексу в період між технічними обслуговуваннями.

Припускаємо, що число і частота технічних обслуговувань визначаються виразами: $t_{\text{п.м}} = t_{\text{с.п}}$; $t_{\text{оп.п}} = t_p$; $t_{\text{с.в}} = t_{\text{в.п}}$. Тоді після деяких перетворень отримуємо коефіцієнт максимальної ефективності використання техніки:

$$R_{\text{е.н}} = \left[1 + \frac{t_{\text{п.м}}}{t_{\text{оп.п}}} + \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{оп}}} \right]^{-1} \exp(-t/t_{\text{оп}}). \quad (12.16)$$

При регламентованому технічному обслуговуванні його ефективність може бути представлена відношенням

$$\frac{t_{\text{оп}}}{t_0} = \left[1 - A(1 - \beta) \frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{по}}} \right]^{-1}.$$

тривалості профілактичних робіт

$$t_{\text{оп}} = t_0 \left[1 - d \frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{по}}} \right]^{-1}, \quad (12.17)$$

де $d = A(1 - \beta)$ – коефіцієнт, що характеризує число відмов, яких запобігли, і якість їх усунення; A – коефіцієнт, що враховує характер відмов; β – ймовірність невияву відмови через недостатню точність вимірювальної апаратури або через низьку кваліфікацію майстра-наладчика.

З врахуванням викладеного вираз коефіцієнту ефективності використання комплексу набуде вигляду

$$R_{\text{е.н}} = \frac{\exp(-(t_{\text{т}}/t_0)(1 - d t_{\text{п}}/t_{\text{по}}))}{1 + \left(\frac{t_{\text{в}}}{t_0}\right)\left(1 - \frac{d t_{\text{п}}}{t_{\text{по}}}\right) + t_{\text{п.м}}/n}, \quad (12.18)$$

де $t_{\text{т}}$ – необхідний час безвідмовної роботи; t_0 – середній час безвідмовної роботи без обслуговування; $t_{\text{по}}$ – напрацювання на відмову при обслуговуванні агрегатів; $t_{\text{в}}$ – середній час відновлення; $t_{\text{п}}$ – періодичність профілактики.

Дослідивши вираз (12.18) на екстремум, знайдемо тривалість технічного обслуговування, яка забезпечить найбільшу ефективність використання агрегатів.

При дотриманні умов $t_0 > t_{\text{в}}$, $t_0 > t_{\text{т}}$, $t_{\text{по}} > t_{\text{в}}$, $m > n$ і $t_{\text{п}}/t_{\text{по}} < 1$ маємо

$$\frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{по}}} = \frac{t_0}{t_{\text{т}}} \left[\frac{1}{d} - \frac{(t_{\text{в}} + t_{\text{т}})n}{m t_{\text{по}}} \right]. \quad (12.19)$$

Таким чином, якщо відомі параметри надійності (t_0 , $t_{\text{в}}$, A , n) і параметри ($t_{\text{по}}$, β , m), що характеризують систему обслуговування, і задано необхідний час безвідмовної роботи $t_{\text{т}}$, то по формулі (12.19) можна визначити оптимальну тривалість технічного обслуговування з умови найбільшої ефективності використання технологічного комплексу або його ланок. При $d \geq 0,8$ найбільша ефективність використання досягається при $t_{\text{п}} = t_{\text{по}}$. При менших значеннях коефіцієнта d збільшення тривалості обслуговування доцільно лише до визначених меж, що забезпечують їх максимальну ефективність.

Залежність ефективності використання агрегатів від d свідчить про те, що будь-яку систему ТО слід будувати з врахуванням властивостей об'єкту експлуатації і характеристик системи експлуатації.

Коефіцієнт A , що враховує характер відмов, визначає пристосованість агрегатів до запобігання відмовам, а величина $1 - \beta$ – якість засобів контролю технічного стану.

Отже, проведення ТО з визначеною тривалістю доцільно, якщо за визначений період роботи агрегату в ньому накопичилось визначене число несправностей, які можна виявити і усунути при заданій системі ТО. Якщо агрегати не пристосовані до запобігання відмовам (мале значення A) або

якість запобігання відмовам низька (велике значення β), технічне обслуговування може привести до зниження ефективності використання агрегатів технологічного комплексу.

Ще більш негативний ефект можливий, коли в процесі ТО не тільки пропускаються несправності, що є, але і неправильно визначається істинний стан елементів, тобто справні елементи видаються за несправні. В цьому випадку можливо внесення несправностей в елементи в процесі ТО.

Обґрунтування схеми організації ремонтно-технічного обслуговування. При інтенсивній роботі технологічних комплексів, коли в умовах виробництва не можна зупиняти агрегат для профілактичних робіт, система ТО може бути організована як безперервно, так і циклами. В обох випадках необхідний резервний агрегат. Профілактичні і відновлювальні роботи проводять на резервних агрегатах в підготовчому циклі $t_{п.ц}$. В цей час інші агрегати працюють протягом часу $t_{р.ц}$. При такій організації технічного обслуговування час відновлення відмов в робочому циклі скорочується до часу, необхідного на заміну агрегату, що відмовив, резервним. Тривала відмова в цьому випадку можлива тільки при відсутності справних резервних агрегатів.

Якість функціонування технологічного комплексу при циклічній схемі обслуговування оцінимо по критерію ефективності використання агрегатів

$$R_{эфн} = K_{ц} K_{г} P(t_{р.ц}) \rightarrow \max, \quad (12.20)$$

де $K_{ц} = t_{р.ц} / (t_{р.ц} + t_{п.ц})$ - коефіцієнт використання агрегатів; $K_{г}$ - коефіцієнт готовності агрегатів, якщо в робочому циклі сумарний час справної роботи дорівнює t_p ; $P(t_{п.ц})$ - ймовірність безвідмовної роботи агрегатів протягом робочого циклу.

Максимальне значення критерію ефективності використання досягається при оптимальній тривалості і частоті обслуговування, які забезпечуються відповідною чисельністю спеціалістів. Це значення критерію може бути визначено на підставі загальної продуктивності ремонтно-обслуговуючої ланки з врахуванням тривалості профілактичних робіт $t_{п.ц}$.

Якщо продуктивність однієї людини $W_{1п} = 1/t_{1п}$, то необхідна чисельність спеціалістів

$$r = \frac{W_{п}}{W_{1п}} = \frac{t_{1п}}{\frac{t_{о} t_{по} \dots (t_{в} + t_{п.ц})}{d} m_4}, \quad (12.21)$$

де $d = A(1 - \beta)$ - коефіцієнт, що характеризує число відмов, які запобігають, і якість їх усунення.

Розглянемо модель ремонтно-технічних дій на технологічний комплекс, що складається з m основних і x резервних агрегатів. Комплекс обслуговують r ремонтних постів (спеціалістів), причому $1 < r < x + 1$.

Ймовірність виходу з ладу будь-якого з m працюючих агрегатів в інтервалі від t до $t + \Delta t$ дорівнює $\lambda \Delta t$, а будь-якого з x резервних агрегатів $-\alpha \lambda \Delta t$ (тут α - частина агрегатів, для яких передбачено резервування. При холодному резервуванні $\alpha = 0$, при гарячому - $\alpha = 1$). Холодне резервування - резервний елемент не працює до виходу з ладу основного агрегату. Гаряче резервування - працюють всі елементи: і основні, і резервні.

При виході з ладу будь-якого агрегату його відправляють на ремонт і починають ремонтувати при наявності вільного посту або ставлять в чергу. Агрегат, що відмовив, замінюють резервним (при його наявності), і комплекс продовжує працювати.

Нехай $x_n(t)$ - загальне число несправних агрегатів в момент часу t , причому $x_n(t) = 0, 1, \dots, x + 1$.

Знайдемо ймовірності надходження і агрегатів на ремонт з виразів:

$$\begin{aligned} P_i &= \rho^i / \{i! \prod_{j=0}^{i-1} [m + \alpha(x - j)] P_o\}, & 0 < i < r \\ P_i &= \rho^i / \{r! r^{i-r} \prod_{j=0}^{i-1} [m + \alpha(x - j)] P_o\}, & r < i < x + 1 \end{aligned} \quad (12.22)$$

де $j = i + 1$; $\rho = \lambda / \mu$.

З врахуванням умови нормування ймовірність нульового стану технологічного комплексу

$$P_0 = [\sum_{i=0}^{x+1} P_i P_0]^{-1}.$$

Стан $x+1$ – це стан вимушеного простою резервованого комплексу, тому коефіцієнт готовності технологічного комплексу $K_r = 1 - P_{x+1}$. Ймовірність перебування комплексу в стані $x + 1$

$$P_{x+1} = \rho^{x-1} / \{r! r^{n+1-r} \prod_{j=0}^{i=1} [m + \alpha(x - j)] P_0\}. \quad (12.23)$$

Викладена модель дозволяє визначити середнє число несправних агрегатів:

$$m_n = \sum_{k=0}^{x+1} i P_i. \quad (12.24)$$

Середнє число агрегатів, що ремонтується

$$m_p = \sum_{i=0}^{r-1} i P_i + r \sum_{k=0}^{x+1} i P_i. \quad (12.25)$$

Алгоритм розрахунку ймовірностей стану при $m = 5$, $x = 2$, $r = 1$ наведений в таблиці 12.3.

Таблиця 12.3 – Алгоритм розрахунку ймовірностей стану системи

Стан системи $k=(m+x+1)$	Число агрегатів, що працюють, m	Число агрегатів в резерві, x	Число агрегатів в черзі	Число вільних постів ТОР	Число агрегатів на відновленні	Число агрегатів в черзі на відновлення	Відношення ймовірностей P_k/P_0	Ймовірність станів P_k
0	5	2	0	1	0	0	P_0/P_0	P_0
1	5	1	0	0	1	0	P_1/P_0	P_1
2	5	0	0	0	1	1	P_2/P_0	P_2
3	4	0	1	0	1	2	P_3/P_0	P_3
4	3	0	2	0	1	3	P_4/P_0	P_4
5	2	0	3	0	1	4	P_5/P_0	P_5
6	1	0	4	0	1	5	P_6/P_0	P_6
7	0	0	5	0	1	6	P_7/P_0	P_7
							$\Sigma P_k/P_0$	$\Sigma P_k = 1$

Ефективність організації обслуговування при холодному резервуванні покращується за рахунок підвищення безвідмовності в робочому циклі внаслідок більш надійного обслуговування резервних агрегатів в підготовчому циклі і за рахунок прискорення відновлюваності агрегатів, що відмовили, внаслідок заміни їх відремонтованими в підготовчому циклі.

Виграш в підвищенні безвідмовності можна представити як

$$\Delta t_{оп} = [1 - A(1 - \beta \Delta) t_n / t_{по}]^{-1}. \quad (12.26)$$

Замінюючи тривалість профілактики t_n на час підготовчого циклу $t_{п.ц}$ і враховуючи, що $rt_n = t_{п.ц}$, отримуємо

$$t_{оп} = t_0 [1 - A(1 - \beta) t_{п.ц} / r t_{по}]^{-1}. \quad (12.27)$$

Підвищення відновлюваності в робочому циклі визначимо із співвідношення

$$\Delta V = t_{в. min} / t_v,$$

де t_v – час, необхідний на заміну резервних агрегатів в робочому циклі.

Середній час відновлення агрегатів, що обслуговуються, визначимо з виразу

$$t_{в.п} = t_{в} \left\{ \Delta V + \exp \left[-\frac{t_{п.п}}{t_0} \right] (1 - \Delta V) \right\}. \quad (12.28)$$

З врахуванням викладеного вираз для визначення критерію ефективності функціонування технологічного комплексу при холодному резервуванні і циклічній системі технічної експлуатації прийме вигляд

$$R_{е.ф.и} = \frac{\exp \{ -(t_{п.п}/t_0) [1 - A(1-\beta)t_{1п}/(rt_{по})] \}}{(1+t_{п.п}/t_{п.п}) \{ 1 + (t_{в}/t_0) [1 - A(1-\beta)t_{1п}/(rt_{по})] [\Delta V + \exp \left[-\frac{t_{п.п}}{t_0} \right] (1 - \Delta V)] \}}. \quad (12.29)$$

Параметри системи технічної експлуатації, що розглядається, можна розрахувати по отриманій залежності з врахуванням різних умов роботи комплексів.

Аналіз виразу (12.29) показує, що при організації ТОР комплексів з холодним резервуванням агрегатів існує оптимальне співвідношення між тривалістю періодів роботи і відновлення.

Ефективність функціонування агрегатів при такій організації ТОР визначається параметрами надійності агрегатів (t_0 , $t_{в}$, A), параметрами системи експлуатації (r , w_1 , $w_{п}$) і співвідношенням між тривалістю робочого періоду і відновлення.

Безперервна система обслуговування властива навантаженому (гарячому) резервуванню. Ефективність безперервної системи обслуговування можна оцінити по коефіцієнту простою, що дорівнює відношенню часу простою агрегатів на обслуговуванні $t_{сп}$ до проміжку часу між обслуговуваннями $t_{пр}$:

$$K_{п} = t_{сп}/t_{пр}. \quad (12.30)$$

Інтенсивність відмов агрегатів, що обслуговуються, при $\beta = 0$ представимо у вигляді

$$\lambda_{пв} = \lambda \{ 1 - A [-\exp (-t_{п}/t_{по})] \}. \quad (12.31)$$

Інтенсивність обслуговувань залежить від часу простою агрегатів при відновленні і обслуговуванні, тобто

$$t_{сп}\mu_{пв} = (t_{в} + t_{сп})^{-1}. \quad (12.32)$$

Відношення величин $\lambda_{пв}$ і $\mu_{пв}$ після підстановки і перетворень отримаємо у вигляді

$$\rho_{пв} = \lambda_{пв}/\mu_{пв} = t_{сп}/t_{пр} + \lambda \{ 1 - A + A \exp (\omega_{1п} r t_{пр} t_{сп}/t_{пр}) \} / \mu. \quad (12.33)$$

Для визначення оптимального значення $K_{п}$ дослідимо вираз (12.33) на екстремум. В результаті отримаємо

$$K_{п.опт} = [\omega_{1п} r t_{пр}]^{-1} \ln (A t_{в} \omega_{1п} r t_{пр} / t_0), \quad (12.34)$$

де t_0 – середній час безвідмовної роботи комплексу без обслуговування.

З цієї формули видно, що $K_{п}$ залежить від параметрів надійності агрегатів (t_0 , $t_{в}$, A), числа ремонтно-обслуговуючих постів і їх продуктивності (r , $w_{1п}$).

Коефіцієнт простою можна представити і як відношення числа агрегатів, що знаходяться в зоні обслуговування, то їх загального числа

$$K_{п} = m_p/m = m^{-1} (\sum_{i=0}^{r-1} i P_i + r \sum_{i=r}^{x+1} P_i). \quad (12.35)$$

Ця залежність дозволяє оцінити вплив чисельності спеціалістів (числа постів) і числа резервних агрегатів на ефективність використання технологічного комплексу. Слід відмітити, що вплив цих двох параметрів нерівнозначний.

Кращою слід вважати ту схему організації ремонтно-технічного обслуговування, яка забезпечує найвищу продуктивність агрегатів технологічного комплексу в умовах виконання робіт, що склалися.

Результати розрахунків систематизувати і оформити у вигляді таблиці 1.4. Зробити висновки по кожному пункту розрахунків.

Практичне заняття №13

Визначення потреби в обмінному фонді запасних частин

Мета роботи – опанувати методику та набути навичок визначення потреби в запасних частинах (деталях, складальних одиницях, системах), навчитися вибирати оптимальний обмінний фонд.

Зміст завдання.

1. Вибрати виробничу ситуацію з таблиці 13.1.
2. Вивчити теоретичні основи визначення кількості запасних елементів і комплектування обмінного фонду.

Таблиця 13.1 – Варіанти завдань (горизонтальними лініями розділені склади комплексів)

Номер варіантів	Склад технологічного комплексу	Число агрегатів
1	T-150K+КПКУ-75	2
2	E-282	2
3	MT3-80+ГВР-6	3
4	ЗИЛ-ММЗ-554	10
5	K-700A	1
6	КСК-100А	3
7	E-281	1
8	MT3-80+ГВР-6	3
9	ГАЗ-САЗ-53Б	12
10	T-150K	1
11	КСК-100А	2
12	T-150K+КПКУ-75	2
13	MT3-80+ГВР-6	3
14	MT3-80+ПСЕ-12,5	8
15	T-150K	1
16	КСК-100А	4
17	E-282	1
18	MT3-80+ГВР-6	3
19	ЗИЛ-ММЗ-554	10
20	T-150K	1
21	T-150K+КПКУ-75	1

22	E-282	3
23	MTЗ-80+ГВР-6	3
24	ГАЗ-САЗ-53Б	10
25	K-700A	1

3. Визначити ймовірність безвідмовної роботи і напрацювання на відмову агрегатів технологічного комплексу.

4. Розрахувати середній час ремонту транспортних засобів, забезпечивши ймовірність їх безвідмовної роботи, необхідною для 60 год експлуатації.

5. Визначити число резервних транспортних засобів, забезпечивши ймовірність їх простою не більше 0,05. Середній час ремонту прийняти з пункту 4.

6. Визначити запас деталей найменш надійних механізмів або систем двигунів, що є в господарстві, забезпечивши довірчу ймовірність 0,95. Ресурс вибрати з таблиць 13.2...13.4, фактичний термін експлуатації прийняти при коефіцієнті варіації 0,8.

Таблиця 13.2 – Показники надійності машин

Марка трактора, машини, двигуна	Напрацювання на відмову, год	Ймовірність безвідмовної роботи
K-700A	84	0,78
ЯМЗ-240	516	0,92
T-150K	82	0,74
СМД-62	833	0,89
MTЗ-80	86	0,78
Д-240	666	0,94
KCK-100A	42	0,79
E-282	71	0,87
KПКУ-75	61	0,85
ГВР-6	57	0,84
ЗИЛ-ММЗ-554	190	0,92
ГАЗ-САЗ-53Б	199	0,92
ПСЕ-12,5	245	0,96
ПИМ-20	260	0,96

Таблиця 13.3 – Ймовірність безвідмовної роботи механізмів і систем двигунів (за 100 годин випробувань)

Механізм, система	ЯМЗ-240	СМД-62	Д-240
KШМ	0,986	0,980	0,995
ГРМ	0,984	0,982	0,988
Система охолодження	0,995	0,995	0,987
Система живлення	0,960	0,970	0,986
Система мащення	0,993	0,958	0,982

Таблиця 13.4 – Показники надійності двигунів 40 автомобілів ЗИЛ-130 при пробігу 170 тис.км

Елемент	Число замін	Ймовірність безвідмовної роботи	Інтенсивність відмов, відмов/1000 км
Колінчатий вал	38	0,963	0,014
Циліндропоршнева група	32	0,978	0,025
Вкладиші шатунні	60	0,993	0,007
Вкладиші корінні	30	0,996	0,012
Кільця	31	0,985	0,007

Головка блоку	12	0,993	0,005
Клапани	52	0,993	0,02
Прокладка головки блоку	158	0,984	0,03
Двигун	413	0,89	

7. По ймовірності безвідмовної роботи і середнього напрацювання на відмову тракторів МТЗ-80 визначити найбільш необхідний елемент обмінного фонду – деталь, двигун або трактор.

8. Розрахувати число запасних частин (елементів) для двигунів автомобілів ЗИЛ, яке повинно бути в технічному обмінному фонді.

Визначення комплексу запасних елементів, що ремонтуються.

Одне з основних умов успішного проведення технічного обслуговування, ремонту і підтримання надійності агрегатів – забезпечення необхідним комплектом запасних частин, інструменту і приналежностей (ЗІП). Відсутність в ЗІП необхідних елементів приводить до збільшення середнього часу ремонту.

Наявність ЗІП безпосередньо впливає на коефіцієнт готовності, який визначають за формулою

$$K_r = m_o / (m_o + m_v + m_{v.a} + m_{ch}) \quad (13.1)$$

де m_o – напрацювання на відмову; m_v – середня тривалість відновлення агрегату; $m_{v.a}$ – адміністративний час при організації усунення відмов; m_{ch} – середній час простою через затримки постачання запасними елементами.

Так як процес відмов елементів агрегатів є випадковим, то в запасі повинні бути елементи всіх типів з визначеною ймовірністю. Визначення цих ймовірностей можливо з використанням теорії масового обслуговування при наступних передумовах.

1. Є система обслуговування запасними елементами. В систему на обслуговування поступає найпростіший потік вимог, що складається з i потоків:

а) потоку відмов елементів, що знаходяться в експлуатації, з інтенсивністю

$$\lambda_1 = n_i \lambda_i, \quad (13.2)$$

де n_i – число елементів даного типу; λ_i – інтенсивність відмов елементів даного типу, що знаходяться в експлуатації;

б) потоку відмов елементів, що знаходяться в резерві, з інтенсивністю

$$\lambda_2 = n_z \lambda_z, \quad (13.3)$$

де n_z – кількість елементів даного типу в резерві; λ_z – інтенсивність відмов елементів даного типу, що знаходяться в резерві.

Інтенсивність сумарного потоку відмов при наявності запасних елементів необхідного типу

$$\lambda_c = \sum \lambda_i. \quad (13.4)$$

2. При надходженні від агрегату потоку вимог на запасний елемент вони негайно задовольняються вільними елементами. При відсутності таких обслуговуюча система приймає чергову вимогу, але при цьому виникає визначена ймовірність простою агрегатів в очікуванні ремонту.

3. Кожний пост обслуговування може одночасно обслуговувати одну вимогу за час $t_{об}$, розподілений по експоненціальному закону.

4. В кожний момент часу система забезпечення агрегатів запасними елементами будь-якого типу може знаходитися в одному з наступних станів:

$k = 0$ – в комплекті ЗІП є всі елементи;

$k = 1$ – в комплекті ЗІП відсутній один елемент;

$k = 2$ – використано два елементи комплекту;

$k = i$ – те ж саме, i елементів комплекту;

$k = n$ – те ж саме, $n - 1$ елементів комплекту;

$k = n + 1$ – те ж саме, всі n_3 елементів комплекту ЗПП.

Отже, можливо всього $n + 1$ стан системи забезпечення. Ймовірність того, що в момент часу t зайнято k елементів ЗПП,

$$P_k(t) = [(t_b \lambda_c)^k / k!] [1 - \exp(-\mu t)^k] \exp(-t_b \lambda_c) [1 - \exp(-\mu t)] \quad (13.5)$$

де t_b – середній час відновлення елементу, $\mu = 1/t_b$ – інтенсивність потоку ремонтів.

Ймовірність зайнятості в момент часу t не більше n_3 елементів ЗПП визначають як суму ймовірностей $n + 1$ несумісних станів елементів: від $k = 0$ до $k = n$. Тоді

$$\sum P_k(t) = \sum [(t_b \lambda_c)^k / k!] [1 - \exp(-\mu t)^k] \exp(-t_b \lambda_c) [1 - \exp(-\mu t)] \quad (13.6)$$

Ймовірність того, що в момент часу t зайнято більше n_3 елементів ЗПП (подія, протилежна попередній),

$$P_{k > n_3}(t) = 1 - \sum P_k(t).$$

В усталеному режимі експлуатації при $t \rightarrow \infty$

$$P_{k > n_3}(t) = \sum [(t_b \lambda_c)^k / k!] [1 - \exp(-t_b \lambda_c)].$$

Позначивши $t_b \lambda_c$ через ρ (приведену щільність потоку), отримаємо

$$P_{k > n_3}(t) = \sum [\rho^k / k!] [1 - \exp(-\rho)].$$

По формулі (13.6) розраховують необхідне число елементів ЗПП, що ремонтуються. Для цього необхідно задати допустиму ймовірність простою агрегату в очікуванні ремонту $P_n(\rho)$ і, користуючись таблицею 13.5, при відомому ρ знайти значення n_3 .

Визначення комплекту запасних елементів, що не ремонтуються

В усталеному режимі при $\mu = 0$ формула (13.6) набуде вигляду

$$P_{k > n_3}(t) = P_n(t) = \sum [(\lambda_c t)^k / k!] [1 - \exp(-\lambda_c t)]. \quad (13.7)$$

В цій формулі величина $\lambda_c t$ представляє собою математичне очікування числа запасних елементів при експоненціальному законі розподілення відмов має вигляд

$$f(t) = \lambda_c \exp(-\lambda_c t) = (1/t_0) \exp(-t/t_0).$$

Технологічний комплекс повинен виконувати задані функції на протязі часу t . За цей час в ньому може виникнути випадкове число відмов елементів. Замість елементу, що відмовив, з запасу беруть новий елемент, і число витрачених елементів n_3 за час t буде дорівнювати числу відмов n .

В цих умовах ймовірність того, що за час t буде потреба в точному числі n_3 запасних елементів, визначають за формулою Пуассона:

$$P_3(t) = [(\lambda_c t)^{n_3} / n_3!] \exp(-\lambda_c t). \quad (13.8)$$

Отже, ймовірність простою

$$P_n(t) = \sum (n_{cp}^k / k!) [1 - \exp(-n_{cp})]. \quad (13.9)$$

Задаючи допустиму ймовірність простою $P_n(t)$ і час експлуатації t , а також знаючи λ_c , знайдемо n_{cp} і n_3 .

Таблиця 13.5 – необхідне число n_3 запасних елементів в залежності від допустимої ймовірності простою P_n і приведеної щільності відмов ρ

$P_n(\rho)=0,15$		$P_n(\rho)=0,10$		$P_n(\rho)=0,05$		$P_n(\rho)=0,01$	
ρ	n_3	ρ	n_3	ρ	n_3	ρ	n_3
0,5	2	0,5	2	0,5	3	0,5	3
1	3	1	3	1	4	1	5
2	4	2	4	2	5	2	6
4	6	4	7	4	8	4	10
6	8	6	9	6	11	6	13
8	10	8	11	8	13	8	15
10	12	10	13	10	15	10	18
20	20	20	23	20	27	20	30
30	30	30	34	30	39	30	44
40	40	40	46	40	50	40	56

При $n_{cp} > 20$ розрахунок по формулі (13.9) стає громіздким. Для спрощення розрахунків можна ввести поняття коефіцієнту запасу:

$$K_3 = n_3 / n_{cp}. \quad (13.10)$$

При $4 < n_{cp} < 30$ і різних значеннях $P_n(t)$ коефіцієнт запасу можна розрахувати за формулами:

$$P_n(t) = 0,15 \quad K_3 = (1,6 + 1,1n_{cp}) / n_{cp};$$

$$P_n(t) = 0,1 \quad K_3 = (1,8 + 1,15n_{cp}) / n_{cp};$$

$$P_n(t) = 0,05 \quad K_3 = (2 + 1,24n_{cp}) / n_{cp}.$$

Вочевидь, що при $P_n(t) > 0,15$ коефіцієнт запасу близький до одиниці, тому число запасних елементів можна розрахувати за формулою:

$$n_3 = n_{cp} = \lambda_c t. \quad (13.11)$$

Якщо необхідне число запасних елементів розраховують для агрегатів, інтенсивність відмов яких визначена по невеликому об'єму статистичних даних, то необхідно або замість величини λ_c використовувати її верхню довірчу межу $\lambda_c + \sigma_\lambda$, або прийняти розподілення напрацювання на відмову по нормальному закону і розрахунок виконати по методу заміщення.

В якості прикладу розглянемо технологічний комплекс, що складається з чотирьох комбайнів Е-282, двох агрегатів МТЗ-80+ГВР-6, шести автомобілів ЗИЛ-ММЗ-554 і одного трактора Т-150К (табл. 13.6). Тривалість експлуатації комплексу 60 годин, гарантована ймовірність роботи $P_c(t)=0,95$.

Таблиця 13.6 – Показники надійності технологічного комплексу

Машина	Число машин N в комплексі	Ймовірність безвідмовної роботи P_i/t , при t_c , що дорівнює		Ймовірність відмови q_i
		100 год	60 год	
Е-282	4	0,87	0,92	0,08

МТЗ-80	2	0,78	0,859	0,141
ГВР-6	2	0,84	0,901	0,099
ЗИЛ-ММЗ-554	6	0,92	0,950	0,050
Т-150К	1	0,74	0,831	0,169

Необхідно визначити число запасних машин (окремо кожної).

Визначимо спочатку ймовірність безвідмовної роботи кожного комбайну при $t_c=60$ годин:

$$P_1 = \exp\left(-\frac{t_c}{T_o}\right) = \exp(-60/719) = 0,92.$$

Ймовірність відмови

$$q_1 = 1 - P_1 = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda_1 = -\ln P_1 / t_{c1} = -\ln 0,92 / 60 = 0,00139 / 60 = 0,00232.$$

Сумарні інтенсивності відмов машин, що ремонтуються, знаходимо з виразу $\lambda_{c1} = \lambda_1 n_1$.

Так, для комбайнів

$$\lambda_{c1} = \lambda_1 n_1 = 0,00232 \cdot 4 = 0,00928.$$

Середній час ремонту кожної машини визначають за формулою $t_{\Sigma} = -t_c / \ln q_i$. Для

комбайну $t_{\Sigma 1} = -60 / \ln 0,92 = 29,4$ год.

$$\text{Розраховуємо } \rho_1 = t_{\Sigma 1} \lambda_{c1}; \quad \rho_1 = 29,4 \cdot 0,00928 = 0,27.$$

З таблиці 13.5 видно, що в резерві повинен бути один кормозбиральний комбайн, так як $\rho_1=0,27$ менше табличного значення $\rho = 0,5$.

Аналогічно визначають потребу в резервних машинах інших марок.

Визначення числа запасних елементів методом заміщення.

Нехай система (комплекс) складається з n_0 основних і n_3 запасних елементів при загальному їх числі N ,

Система відмовить, якщо вийдуть з ладу основні і резервні (n_0+n_3) елементи. В цьому випадку напрацювання на відмову $t_0=t_1+t_2+\dots+t_N$.

На підставі граничної теореми ймовірностей припускаємо, що величина t_0 змінюється по закону нормального розподілення з характеристиками

$$M(t_0) = n_0 t_{\Sigma}; \quad D(t_0) = n_0 D t_{\Sigma}.$$

Тоді

$$P(t_0 > t) = F[(n_0 t_{\Sigma} - t) / \sqrt{n_0 D t_{\Sigma}}], \quad (13.12)$$

де t_n , t_c – проектний і фактичний термін експлуатації.

Враховуючи, що $\frac{\sqrt{D_{\Sigma}}}{t_{\Sigma}} = v$ (тут v – коефіцієнт варіації), і знаючи, що система містить n_0 елементів, отримаємо

$$P_c(t) = F\left[\frac{(1-t_n)/(n_0 t_{\Sigma})}{v \sqrt{1/n_0}}\right] = F[A(t)].$$

При відомих вимогах до $P_c(t)$ значення функції F можна прийняти з стандартних значень,

вказаних нижче:

$P_c(t)$	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$F[A(t)]$	0,25	0,52	0,84	1,28	1,64	2,33

Припускаємо $\left[\frac{(1-t_n)/(n_o t_g)}{v \sqrt{1/n_o}} \right] = A$. Після перетворення цього виразу отримаємо

$$\frac{t_n N}{(n_o t_g)} + A v \sqrt{1/n_o} - 1 = 0. \quad (13.13)$$

Вирішивши дане рівняння відносно $\sqrt{1/n_o}$, з врахуванням $n_3 = N$ – отримаємо

$$n_3 = \left[\frac{2 t_n N / t_g}{\sqrt{(A v)^2 + \frac{4 t_n N}{t_g - A v}}} \right]^2 - N. \quad (13.14)$$

При рішенні рівняння слід пам'ятати, що число запасних елементів не може бути від'ємним.

З рівняння (13.14) видно, що на забезпечення системи із заданою довірчою ймовірністю впливають проектний і фактичний терміни експлуатації виробів (t_e , t_n), число N машин в групі, в яких встановлено елемент, що замінюється, і коефіцієнт варіації напруження v .

З врахуванням викладеного визначимо з довірчою ймовірністю $P_c(t) = 0,9$ число запасних покришок для різної кількості автомобілів, якщо відомо, що ресурс покришки $t_n = 100$ тис.км. Фактичний термін експлуатації t_e в залежності від умов експлуатації складає 20, 50 і 80 тис. км при коефіцієнті варіації $v = 0,8$.

Розрахунки виконуємо по формулі (13.14) з врахуванням вказаних раніше стандартних значень $F[A(t)]$.

Результати розрахунків записані в таблиці 13.7.

Таблиця 13.7 – Потреба в запасних частинах в залежності від фактичного напруження на відмову і парку автомобілів

Число автомобілів в господарстві	Необхідний запас покришок при $P_c(t) = 0,9$ і фактичному напруженні на відмову, тис. км		
	20	50	80
10	47,8	15,1	6,7
20	90,7	27,0	10,7
50	216,6	60,7	21,03

Слід враховувати, що із збільшенням довірчої ймовірності потреба в запасних частинах збільшується. Для фіксованих значень довірчої ймовірності із збільшенням парку машин питома потреба в запасних елементах знижується.

Розглянуті формули дозволяють розрахувати число запасних елементів визначеного типу із заданою ймовірністю простою машин. Якщо машина містить елементи декількох груп, від яких залежить надійність всієї машини, то для визначення їх числа загальне ймовірність простою

необхідно розділити на групи елементів.

Загальна ймовірність простою

$$P_{об} = \sum P_{ni} q_i, \quad (13.15)$$

де P_{ni} – ймовірність простою через відсутність запасного елементу i -ої групи; q_i – ймовірність відмови елементу i -ої групи.

Ймовірність виконання заданих функцій технічними засобами при наявності ЗП розраховуємо за формулою:

$$P_c(t) = 1 - P_{об} = \Pi - (1 - P_{ni}) = \Pi P_{ci}(t). \quad (13.16)$$

Обґрунтування потреби в елементах обмінного фонду. При обґрунтуванні потреби в елементах обмінного фонду необхідно встановити для даних умов роботи, що саме з технічних засобів ефективніше резервувати: деталі, складальні одиниці, повнокомплектні машини або агрегати.

Уявимо автомобіль у вигляді багаторівневої ієрархічної структури типу «дерево»: автомобіль в цілому, його агрегати, складальні одиниці, деталі. На кожному рівні утворюється своя підсистема. Така схематизація дозволяє при нормуванні показників надійності складових частин використовувати дворівневі структури типу «система – елемент». Наприклад, машини – агрегати – елементи машин тощо.

Більшість підсистем автомобіля можна розглядати як послідовне з'єднання елементів. Ймовірність безвідмовної роботи автомобіля при деякому напрацюванні t можна визначити, припускаючи, що він складається з статистично незалежних елементів:

$$P_{\Sigma}(t) = \Pi P_k(t) = \exp[-\Sigma \int \lambda_k(t) dt], \quad (13.17)$$

де $\lambda_k(t)$ – інтенсивність відмов елементів.

При заданій безвідмовності і встановленому (по агротехнічним вимогам) напрацюванні $t_y = t$. Позначимо $\gamma = P(t_y)$. Тоді

$$\gamma = \exp[-\Sigma \int \lambda_k(t) dt]. \quad (13.18)$$

Вочевидь, що для забезпечення безвідмовності γ існує багато $\lambda_k(t)$, які потрібно знати. В установившемся режимі експлуатації

$$\lambda_k(t) = \text{const}; P_k(t_y) = \exp[-\Sigma \int \lambda_k(t_y)]. \quad (13.19)$$

Ця передумова справедлива, якщо працездатність відновлюють регулюваннями, заміною деталей або їх ремонтом в неробочий час, тобто у випадку рівності потоків відмов і відновлень.

В більшості випадків при моделюванні процесу використовують принцип найбільш «слабкого» елементу, для якого вважають $\lambda_k(t) = \text{const}$.

Ймовірність безвідмовної роботи автомобіля з резервуванням при найпростішому потоці відмов визначають по закону Пуассона.

Припускаючи потоки відмов елементів найпростішими, отримують

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \Sigma \lambda_k(t). \quad (13.20)$$

Отже ймовірність відмови k елементу при напрацюванні t

$$q_k(t) = 1 - P_k(t). \quad (13.21)$$

Нормування без відмови на різних рівнях ієрархічної схеми може бути виконано порізному. Для послідовно з'єднаних елементів надійність кожного з них повинна бути

$$P_k(t) = m \sqrt{P_c(t)}, \quad (13.22)$$

де $P_c(t)$ – встановлена безвідмовність системи елементів.

При наявності резервних елементів вимог до безвідмовності елементу визначають з виразу

$$P_k(t) = 1 - m\sqrt{P_c(t)}. \quad (13.23)$$

Визначимо показники надійності конкретного агрегату.

Ймовірність безвідмовної роботи посівного агрегату за час $t = 100$ годин визначимо при показниках, вказаних в таблиці 13.8. Припускаємо, що напрацювання на відмову машин, агрегатів і механізмів підпорядковується експоненціальному закону. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи і середній час до першої відмови при різних способах резервування.

Ймовірність безвідмовної роботи двигуна без резервування

$$P_{дв}(100) = PR_i = 0,923 \cdot 0,818 \cdot 0,882 \cdot 0,716 \cdot 0,659 = 0,314.$$

Середнє напрацювання до першої відмови $t_{cp} = 1/\lambda$. Інтенсивність відмов розраховуємо з використанням формули $P_{дв}(100) = \exp[-\lambda \cdot 100] = 0,314$, звідки

$$\lambda = -\ln P_i/t_s = 1,15/100 = 0,0116. \text{ Тоді } t_{cp} = 1/\lambda = 1/0,0116 = 86,2 \text{ годин.}$$

Надійність трактора без резервування

$$P_t(100) = PR_i = 0,314 \cdot 0,925 \cdot 0,859 \cdot 0,904 \cdot 0,818 \cdot 0,846 = 0,156.$$

Середнє напрацювання трактора до першої відмови при $\lambda = -\ln P_i/t_s = 1,86/100 = 0,0186$

$$t_{cp} = 1/\lambda = 1/0,0186 = 54 \text{ години.}$$

Надійність посівного агрегату без резервування

$$P_a(100) = P_t P_{сц} P_c^2 P_6^2 = 0,156 \cdot 0,867 \cdot 0,768^2 \cdot 0,942^2 = 0,0708.$$

Середнє напрацювання агрегату до першої відмови буде при $\lambda = -\ln P_i/t_s$:

$$t_{cp} = 1/\lambda = 1/0,0264 = 37,9 \text{ годин.}$$

Визначимо показники надійності агрегату, якщо в резерві є різні комплекти запасних елементів обмінного фонду. Нехай в резерві є лімітуюча деталь змашувальної системи. Тоді ймовірність безвідмовної роботи двигуна

$$P_{дв} = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 (1 + \lambda_5 t),$$

$$\text{де } \exp(-\lambda_5 \cdot 100) = 0,659; \quad \lambda_5 = 0,00417.$$

Таблиця 13.8 – Показники надійності машин і їх складальних одиниць

Машина, агрегат, складальна одиниця	Напрацювання на відмову, t_0 , год	Ймовірність безвідмовної роботи P_i
Двигун: КШМ	1250	0,923
ГРМ	500	0,818
система охолодження	800	0,882

система живлення	300	0,716
змащувальна система	240	0,659
Коробка передач	1300	0,925
Шасі	660	0,859
Трансмісія	1000	0,904
Рульове керування	500	0,818
Гідронавісна система	600	0,846
Сівалка (дві)	38	0,768
Зчіпка	70	0,867
Борона (дві секції)	170	0,942

Тоді $P_{дв} = 0,923 \cdot 0,818 \cdot 0,882 \cdot 0,716 \cdot 0,659(1 + 0,417) = 0,446$. Середній час безвідмовної роботи двигуна

$$t_{ср} = 1/0,00807 = 123,9 \text{ годин.}$$

При наявності в резерві по одному комплекту кожного механізму або кожної системи ймовірність безвідмовної роботи двигуна

$$P_{дв} = [exp - (\lambda_1 t)(1 + \lambda_1 t)][exp - (\lambda_2 t)(1 + \lambda_2 t)][exp - (\lambda_3 t)(1 + \lambda_3 t)] \times \\ \times [exp - (\lambda_4 t)(1 + \lambda_4 t)][exp - (\lambda_5 t)(1 + \lambda_5 t)].$$

Оскільки $\lambda_i t = -\ln P_{it}$, $\lambda_1 t = 0,08$; $\lambda_2 t = 0,20$; $\lambda_3 t = 0,125$; $\lambda_4 t = 0,334$; $\lambda_5 t = 0,417$,

$$P_{дв} = [0,923(1 + 0,08)][0,818(1 + 0,2)][0,882(1 + 0,125)][0,716(1 + 0,334)] \times \\ \times [0,659(1 + 0,417)] = 0,997 \cdot 0,982 \cdot 0,992 \cdot 0,955 \cdot 0,934 = 0,866.$$

Середній час безвідмовної роботи двигуна при такому резервуванні

$$t_{ср} = 1/0,00143 = 699,3 \text{ годин.}$$

При наявності резервних елементів двигуна ймовірність безвідмовної роботи трактора

$$P_{тр} = 0,866 \cdot 0,925 \cdot 0,859 \cdot 0,904 \cdot 0,818 \cdot 0,846 = 0,43.$$

Якщо в постійному резерві є повнокомплектний трактор без резервних елементів, то

$$P_i = 1 - (1 - q)^m = 1 - (1 - 0,156)^2 = 0,313,$$

де m – число одночасно працюючих елементів.

Середній час безвідмовної роботи при резервуванні елементами

$$t_{ср} = 1/0,00844 = 118,6 \text{ годин.}$$

При резервуванні повнокомплектним трактором

$$t_{\text{ср}} = 1/0,00116 = 86,2 \text{ годин.}$$

З вищевикладеного видно, що резервування окремими елементами ефективніше, ніж повнокомплектними машинами. Надійність посівного агрегату при резервуванні двигуна трактора окремими елементами і окремо кожної сільськогосподарською машиною можна визначити з виразу

$$P_{\text{ар}} = P_{\text{тр}} [1 - (1 - P_{\text{сц}})^2] [1 - (1 - P_{\text{с}})^3] [1 - (1 - P_{\text{с}})^3] = \\ = 0,430 [1 - (1 - 0,867)^2] [1 - (1 - 0,768)^3] [1 - (1 - 0,942)^3] = 0,416.$$

Середнє напрацювання на відмову

$$t_{\text{ср}} = 1/0,00876 = 114 \text{ годин.}$$

Обґрунтування потреби в агрегатах обмінного фонду при недостатке інформації. В сільськогосподарському виробництві часто відсутня повна інформація про всі фактори – умови ($z_1, z_2, \dots, z_k$), в яких буде функціонувати ремонтна майстерня, пункт технічного обслуговування, технічний обмінний пункт, дилерська дільниця (система). В цих умовах рішення приймають за допомогою методу аналізу виробничої ситуації з використанням теорії ігор.

При оптимізації технічних і технологічних рішень звичайно розглядають дві сторони взаємодії:

А (активну внутрішню) – організатори виробництва, тобто виконавці;

В (зовнішню) – сукупність випадково виникаючих виробничих ситуацій.

Активна сторона повинна прийняти таку стратегію (рішення), щоб отримати максимальний ефект. При цьому зовнішня сторона активно не протидіє заходам організаторів виробництва, але точний стан зовнішніх факторів невідомий. Прийняття рішень ігровими методами ґрунтується на визначених правилах, які регламентують можливі дії сторін, що приймають участь у грі, тобто зміна цільової функції протікає при сполученнях визначених стратегій взаємодіючих сторін.

В умовах ризику формулювання задачі вибору рішення наступна: при заданих умовах a_i і дії зовнішніх факторів z_k , ймовірність яких відома, знайти таке рішення X_m , при яких можливе отримання екстремального значення цільової функції.

Виробнича ситуація. Згідно статистичних даних, на технічному обмінному пункті для організації ремонту щоденно є потреба в не більш, ніж чотирьох агрегатах, складальних одиницях (двигунів, коробок передач, муфт зчеплення тощо), причому ймовірність того, що в агрегатах не буде потреби на протязі зміни (добі), дорівнює 0,1; є потреба в одному агрегаті – 0,4; в двох – 0,3; трьох – 0,1; чотирьох – 0,1. Вказані ймовірності можна розглядати як ймовірності реалізації стратегій сторони В. Перша стратегія B_0 полягає в тому, що для ремонту фактично є потреба в:

B_0 – нуль агрегатів;

B_1 – один агрегат;

B_2 – два;

B_3 – три;

B_4 – чотири агрегати (табл. 13.9).

На технічному обмінному пункті можна застосовувати наступні стратегії:

A_0 – не мати запасу

A_1 – в запасі один агрегат;

A_2 – два; A_3 – три; A_4 – чотири агрегати.

В реальних умовах сполучення стратегій A_i і B_j може бути випадковим, але кожному сполученню цих стратегій відповідають величини a_{ij} , які розраховують для сторони A_i виходячи з наступних умов: зберігання одного невогнеобов'язаного агрегату оцінюють як ушерб в одну умовну одиницю (-1), задоволення потреби в одному агрегаті – прибуток в дві одиниці (+2); відсутність

необхідного агрегату – ущерб в три одиниці (-3).

Причини ущербу і прибутку в кожному конкретному випадку можуть бути різними. Величини ущербу і прибутку повинні бути обґрунтовані, так як від них залежить прийняття оптимального рішення. Задоволення потреб в агрегатах пов'язано зі скороченням простоїв техніки в ремонті, що приносить прибуток, а надлишковий запас викликає додаткові витрати на зберігання.

Таблиця 13.9 – Стратегії сторін

Зовнішні фактори (зовнішня сторона)		Ймовірність заміни g_j	Виконавці (внутрішня сторона)	
Стратегія B_j	Необхідне число агрегатів p_j		Стратегія A_i	Число агрегатів p_j на технічному обмінному пункті
B_0	0	0,1	A_0	0
B_1	1	0,4	A_1	1
B_2	2	0,3	A_2	2
B_3	3	0,1	A_3	3
B_4	4	0,1	A_4	4

Виграші при можливих сполученнях стратегій сторін зводять в платіжну матрицю (таблиця 13.10).

Наприклад, при сполученні стратегій A_1 і B_3 виграш складе $a_{13} = 1 \cdot 2$ (при потребі трьох агрегатах на обмінному пункті є один агрегат) - $2 \cdot 3$ (дві заявки не задоволені) $= 2 - 6 = -4$; при сполученні стратегій A_3 і B_1 для заміни необхідний один агрегат, а на пункті є три, $a_{31} = 1 \cdot 2$ (одна вимога задоволена) - $2 \cdot 1$ (в двох агрегатах не має потреби) $= 2 - 2 = 0$ тощо.

При відомих ймовірностях кожного стану B_j вибирають стратегію A_i , при якій математичне очікування виграшу буде максимальним. Для цього розраховують середній виграш по кожній строчці для i -ої стратегії:

$$\bar{a}^i = g_1 a_{i1} + g_2 a_{i2} + \dots + g_n a_{in} = \sum_{j=1}^n g_j a_{ij}.$$

Максимальне значення $\bar{a}^i$ відповідає оптимальній стратегії. Матриця виграшів для даного прикладу представлена в таблиці 13.11. З цієї таблиці (матриці виграшів) видно, що для різних сполучень стратегій A_i і станів B_j оптимальним буде той, при якому забезпечується максимальний середній виграш, тобто стратегія A_3 при створенні оборотного фонду в три агрегати ($p_3 = 3$).

Слід відмітити, що розрахунок, проведений на підставі ймовірностей станів, але без врахування економічної оцінки, дозволяє отримати середньозважене число агрегатів, в яких є потреба за зміну.