

# Дисципліна: ТЕОРІЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИН

Кафедра: ТСМ ХНТУСГ ім. П. Василенка  
ЕМТП ДДАЕУ,

## Опис предмету курсу

Курс 1	Спеціальність	Характеристика навчального курсу
Кількість кредитів ECTS: 3	208 «Агроінженерія»	Рік підготовки: 1 Семестр: 2
Загальна кількість годин: 90	Освітньо-кваліфікаційний рівень „Магістр”.	Лекції 12 год. Лабораторні заняття: 24 год.
Семестр: 2		Самостійна робота: 54 год.
Тижневих годин: 4		Вид контролю: Е

Лектор: доцент Деркач Олексій Дмитрович

# Рекомендована література:

## Основна:

1. Аллилуев В.А. Техническая эксплуатация машинно-тракторного парка /В.А. Аллилуев, А.Д. Ананьин, В.М. Михлин. – М.: Агропромиздат, 1991 – 367с.
2. Козаченко О.В. Технічна експлуатація машин АПК: теоретичні аспекти: навчальний посібник /О.В. Козаченко, С.П. Сорокін, О.В. Блезнюк, О.М. Шкрегаль. – Харків: Торнадо, 2009. – 140 с.
3. Козаченко О.В. Практикум з теорії технічної експлуатації сільськогосподарської техніки / О.В. Козаченко, О.В. Блезнюк, О.М. Шкрегаль – Х.: ХНТУСГ, 2008 – 64 с.
4. Кобець А.С., Ільченко В.Ю., Козаченко О.В. та ін. (всього 8 осіб).  
Проектування технологічних процесів технічного обслуговування машин /  
Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2011. – 178 с.
5. Лімонт А.С. Теоретичні основи забезпечення працездатності машин: Навч. посіб. /Держ. агроєколог. ун-т. – Житомир, 2008. – 420 с.
6. Малкин В.С. Техническая эксплуатация автомобилей: Теоретические и практические аспекты: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Академия, 2007. – 288 с.
7. Эксплуатационная надежность сельскохозяйственных машин /Под ред. Аниловича В.Я. – Минск: Урожай, 1974. – 264 с.

## Додаткова література:

1. Атапин В.Г. Основы работоспособности технических систем. Автомобильный транспорт : учеб. пособие / В.Г. Атапин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 192 с.
2. Авдонькин, Ф. Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей : учеб. Пособие для вузов / Ф. Н. Авдонькин. – М. :Транспорт, 1985. – 216 с.
3. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин : учеб. пособие / Ю.В. Баженов. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 160 с. – ISBN 5-89368-655-1.
4. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: Технологія. – К.: Вища школа, 2007. – 527 с.
5. Моргунов Ю.Н. Техническая эксплуатация путевых и строительных машин. М., 2009. — 701 с.
6. Хасанов Р.Х. Основы технической эксплуатации автомобилей/ Р.Х. Хасанов. – Оренбург, 2003.–193 с.
7. Яхьяев Н.Я. Основы теории надежности и диагностика: / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. – М: Академия, 2009. – 256 с.

# Тема 1. Зміна технічного стану машин: причини, аналіз дослідження

## План:

1. Сутність дисципліни ТТЕ, основні поняття та визначення.
2. Основні причини зміни технічного стану машин при експлуатації.
3. Опис випадкових величин технічної експлуатації математичними методами.
4. Моделі втрати працездатності машин.
5. Конструкторсько-технологічні методи підвищення працездатності машин.

# 1. Сутність дисципліни ТТЕ, основні поняття та визначення

## Теоретичні основи технічної експлуатації машин

### Математичні основи

Розробка методів розрахунків надійності, діагностики, обслуговування і ремонту на основі теорії імовірностей, математичної статистики, теорії інформатики, математичної логіки та інших розділів математики.

### Теорія тертя і зношування

Встановлення закономірностей фізики відмов, що є підґрунтям прогнозування технічного стану машин та їх удосконалення.

### Теорія мащення

Встановлення напрямків та основних причин зношування елементів машин при використанні мастильних матеріалів.

### Прогнозування

Прогнозування працездатності, організація заходів ТО і ремонту машин.

### Економіка

Оцінка ефективності технічної експлуатації машин з економічних позицій, як основного критерію при вирішенні практичних питань.

# Технічний стан машини

Справний

Працездатний

Граничний

## Відмови

За значущістю:  
- критичні;  
- суттєві;  
- несуттєві.

За характером виникнення:  
- поступові;  
- раптові.

За характером виявлення:  
- явні;  
- приховані.

За причиною виникнення:  
- конструктивні;  
- виробничі;  
- експлуатаційні;  
- деградаційні.

# Комплексні показники технічної експлуатації

## Надійність

Безвідмовність

Довговічність

Ремонто-  
придатність

Збережуваність

Імовірність  
безвідмовної  
роботи:

Інтенсивність  
відмов:

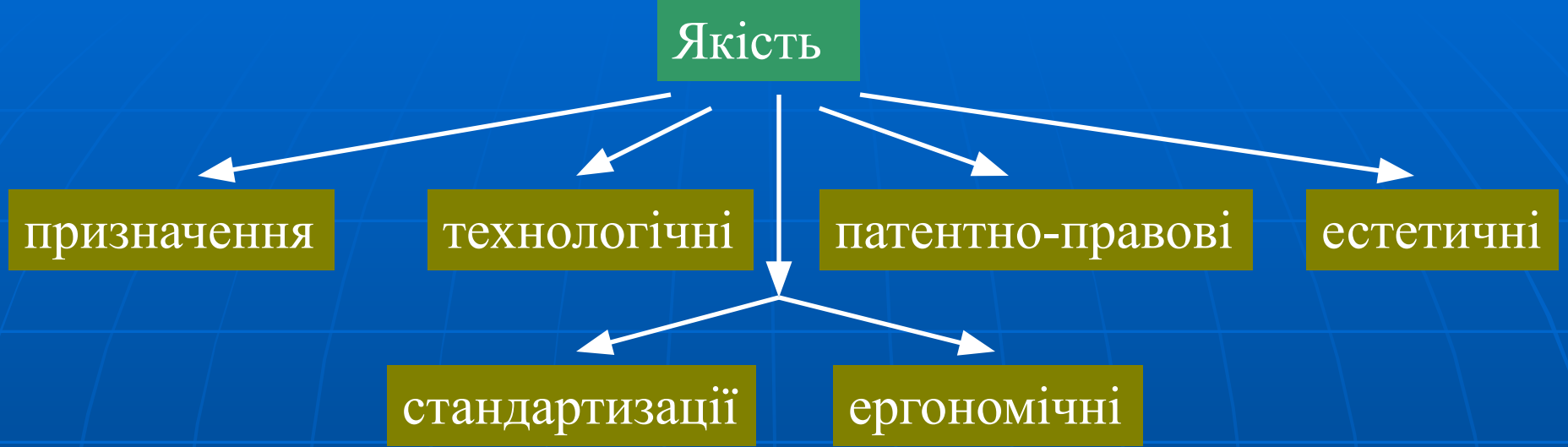
Параметр потоку  
відмов:

Напрацювання  
на відмову:

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1) \quad \lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{cp} \cdot \Delta t} \quad (2) \quad \mu(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (3) \quad T = \frac{1}{\mu(t)} \quad (4)$$

$N$  – загальна кількість  
об'єктів у виборці;  
 $n(t)$  – кількість об'єктів,  
що відмовили до часу  $t$

$\Delta t$  – інтервал часу;  
 $N_{cp}$  – середня кількість  
справних об'єктів в  
інтервалі  $\Delta t$ ;



## Структура розуміння “Якість машини”





## 2. Основні причини зміни технічного стану машин при експлуатації

### Випадкові причини

- сховані конструктивні дефекти;
- умови експлуатації машин;
- порушення правил експлуатації (навантаження, швидкісний режим).

Зношування

Корозія

Руйнування внаслідок втомлення

Фізико-хімічні зміни матеріалу деталей

### Знос деталей

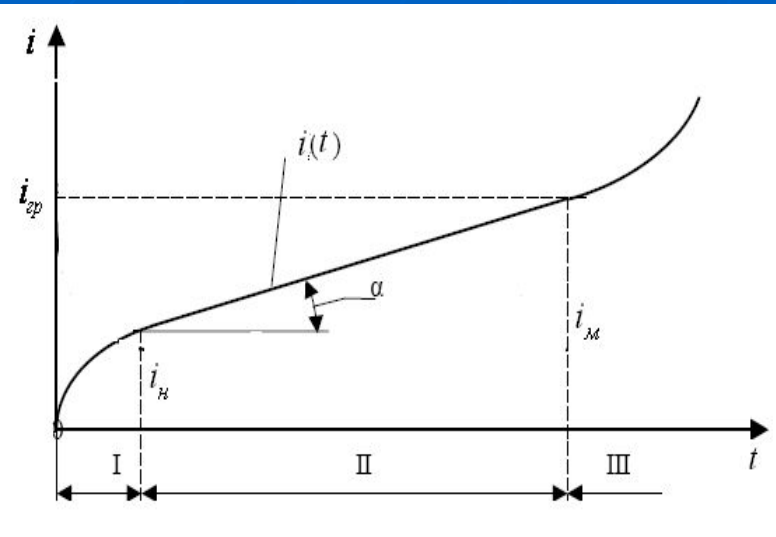
Від матеріалу і якості обробітки поверхні

Діючих навантажень

Швидкісного і температурного режимів

Якості мастильних матеріалів

# Залежність зносу від напрацювання



I – припрацювання поверхонь тертя;  
II – період нормальної експлуатації;

$$t_1 = t_0 + \frac{i_1 - i^3}{tg\alpha} \quad (5)$$

$t_0$  - довготривалість припрацювання деталей;  
 $i_1, i^3$  - відповідно, знос, що відповідає максимально допустимому зазору в спряженні і номінальному після припрацювання;  
 $tg\alpha$  - характеристика інтенсивності зношування.

III – період аварійного зношення.

## Фактори впливу інтенсивності зношування

- умови роботи (пит.тиск, характер навантаження, температурний та швидкісний реж.)
- властивості матеріалів та їх змінність в процесі роботи;
- умови роботи спряжень, характер контакту і обробки матеріалів;
- вид і властивості продуктів зношування;
- своєчасність і якість технічного обслуговування;
- якість паливно-мастильних матеріалів.

# Критерії граничного зносу

Технічний

Якісний

Економічний

Комплексний

## Напрямки досліджень зношування

→ отримання максимального ресурсу деталей;

→ можливості управління характером зношування таким чином, коли змінна геометрія робочої частини забезпечує заданий рівень виконання машиною агротехнічних вимог;

→ можливості зниження опору абразивного матеріалу в напрямку руху машини з метою зменшення витрат ПММ та металомісткості конструкції.

# Фактори впливу швидкості зношування МТА

- запиленість та температура навколишнього повітря;
- вологість ґрунту;
- стан і рельєф полів;
- режим роботи МТА при виконанні технологічного процесу;
- якість паливно-мастильних матеріалів;
- порушення правил експлуатації;
- сезонні умови.

# Фактори впливу при експлуатації автомобілів

Дорожні умови

п'ять категорій доріг

Умови руху

три групи умов руху (передміський, в межах міста до і більше 100 тис. чол.); швидкісний режим та ін.

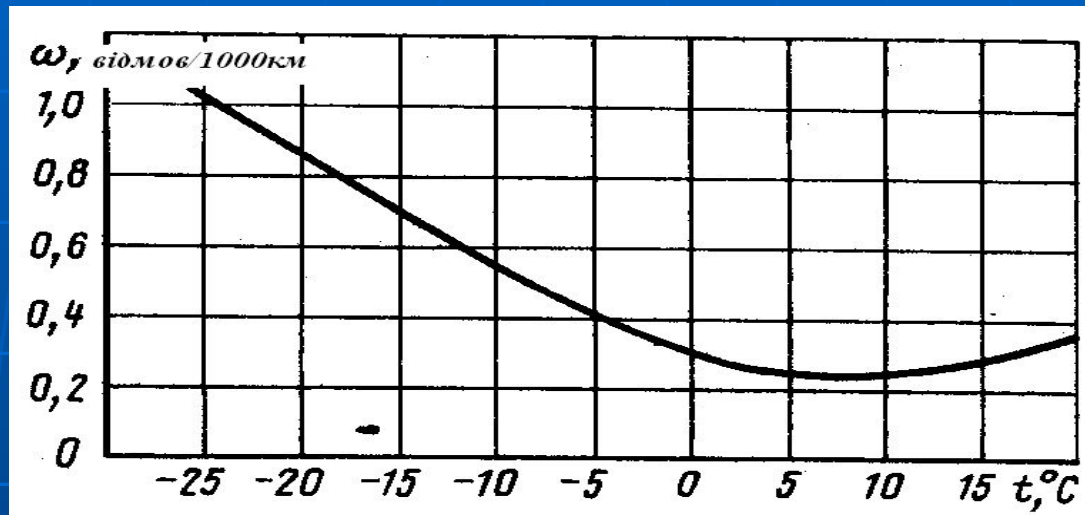
Умови перевезень

Швидкісний режим + довжина завантаженої їздки, коефіцієнт використання пробігу, вантажу та ін.

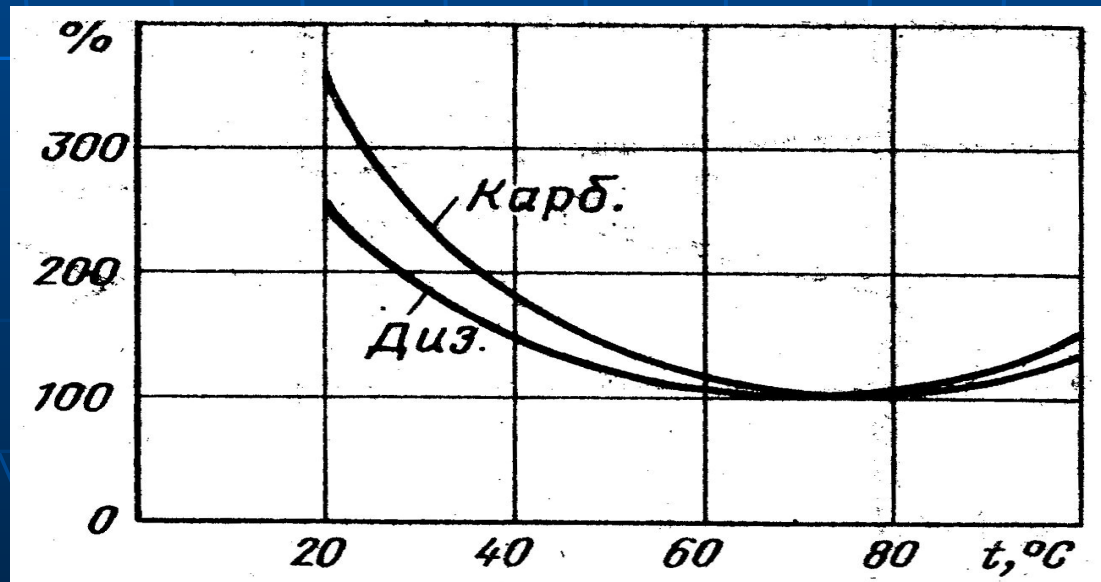
Сезонні умови

Коливання температури повітря, зміна дорожніх умов, вологість, вітер, сонячна радіація та ін.

# Вплив температури навколишнього повітря на загальну кількість відмов автомобілів

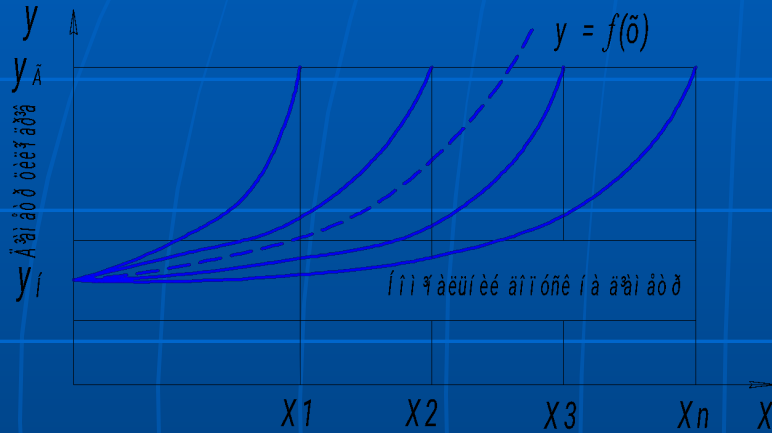


Залежність відносної швидкості зносу циліндрів двигунів від температури охолоджуючої рідини



### 3. Опис випадкових величин технічної експлуатації математичними методами

Можливість зміни діаметра циліндрів двигуна



Числові характеристики

випадкових величин:

Математичне сподівання  $m_x$ :

$$m_x = \frac{\sum X_i}{n} = \sum X_i P_i, \quad (6)$$

$n$  - число випадкових величин

$X_i$   $P_i$  - імовірність спостережень.

Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - m_x)^2}{n}}; \quad (7)$$

Коефіцієнт варіації:  $v = \frac{\sigma_x}{m_x}. \quad (9)$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - m_x)^2}{n-1}}. \quad (8)$$

Середнє гармонійне значення:

$$m_x = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}. \quad (10)$$

Приклад. Визначити середню шляхову витрату палива двох автомобілів, якщо на 100 км вони витрачають

$$X_1 = 20 \text{ л}$$

$$X_2 = 30 \text{ л}$$

Середня витрата:  $\bar{O} = \frac{20 + 30}{2} = 25$  , л / 100 км

Залити по 60 л

$$S_1 = 300 \text{ км}$$

$$S_2 = 200 \text{ км}$$

Середня витрата:  $\bar{O} = \frac{120 \cdot 100}{500} = 24$  , л / 100 км;

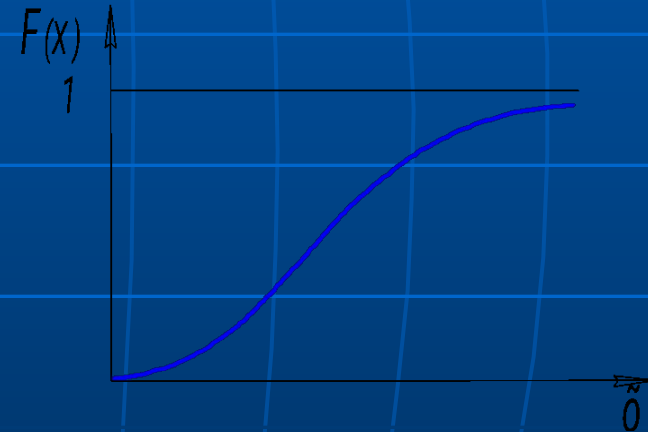
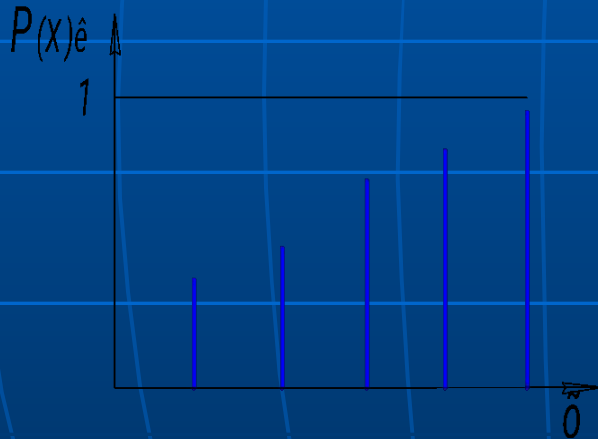
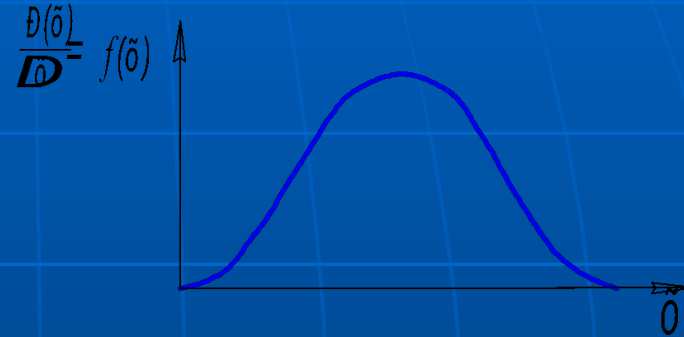
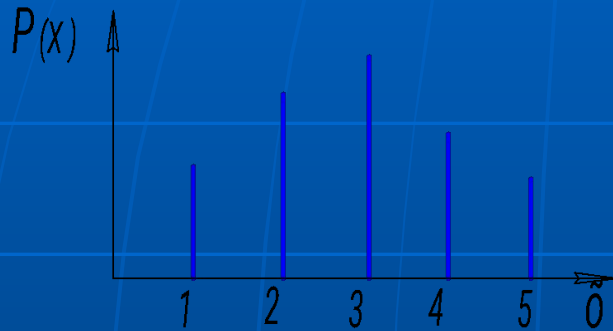
Середнє гармонійне значення витрат:  $m_x = \frac{2}{\frac{1}{20} + \frac{1}{30}} = 24$  , л / 100 км.



# Закони розподілу імовірностей

Дискретні величини

Неперервні величини



$$P(X < X_0) \quad (11)$$

$$P(X < X_0) = \sum P(X_i) = \sum f(X) dX \quad (12)$$

$$\Delta X \rightarrow 0$$

$$P(X < X_0) = \sum P(X_i) \quad (13)$$

$$P(X < X_0) = F(X) = \int f(X) dX \quad (14)$$

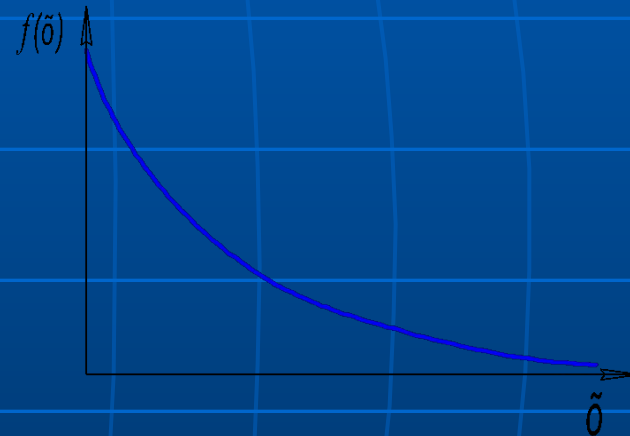
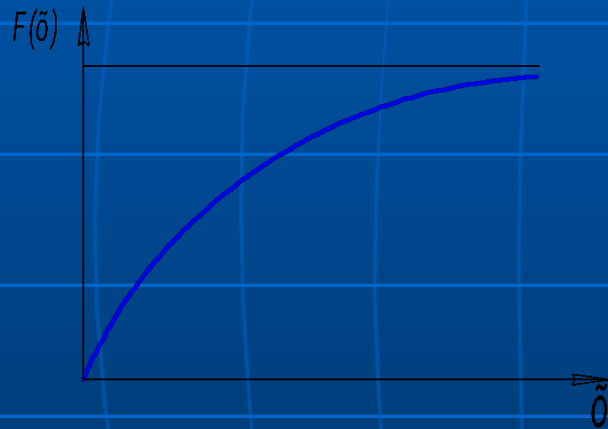
# Експоненціальний закон розподілу

$$F(X) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (15) \quad f(X) = \lambda - e^{-\lambda x}, \quad (16)$$

де  $\lambda = 1/m_x$  - параметр закону розподілу

$$v = 1$$

$$\sigma_x = m_x$$

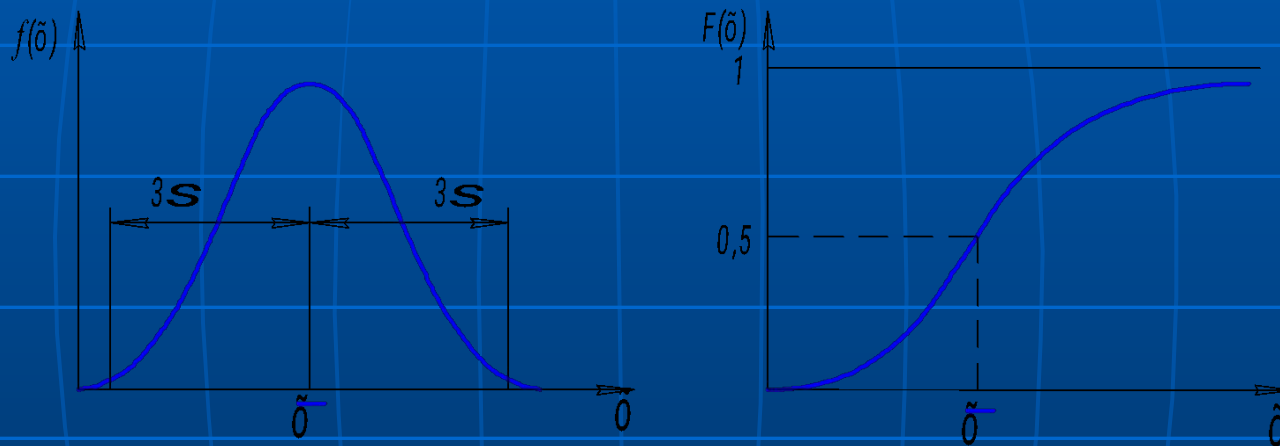


Використання закону в практиці технічної експлуатації :

- напрацюванні на відмову машини при виході з ладу різних деталей;
- напрацювання на відмову (моменти виникнення потреби в заміні) конкретної деталі для групи одночасно працюючих машин;
- періодичність раптових відмов деталей внаслідок аварії

# Нормальний закон розподілу

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (17)$$



Використання закону в практиці технічної експлуатації :

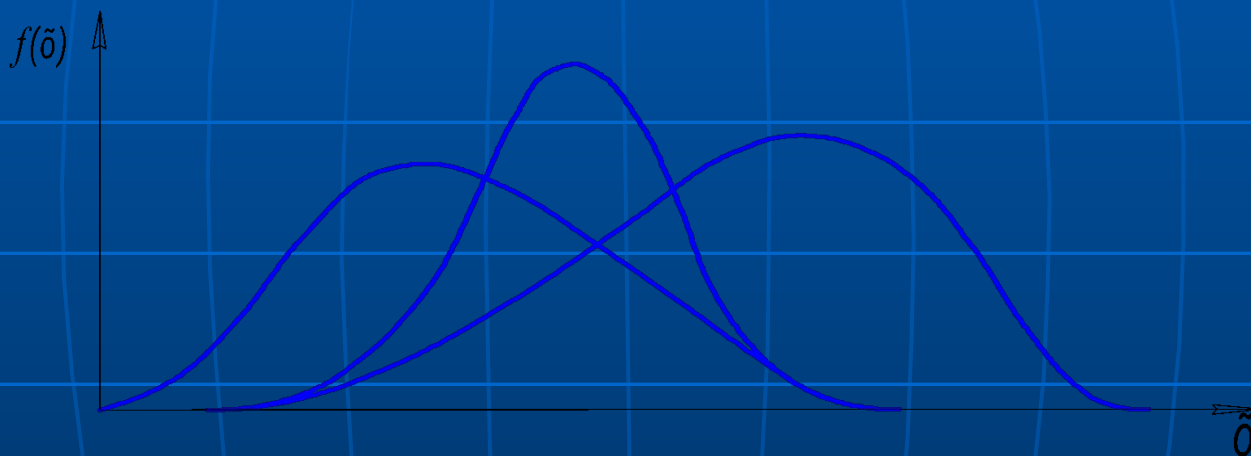
- ресурсу спрацювання деталей;
- часу простоїв машин в технічному обслуговуванні і ремонті;
- трудомісткості технічного обслуговування і ремонту;
- напрацювання машин згідно календарних періодів;
- витрат експлуатаційних матеріалів.

# Закон Вейбулла

$$F(X) = 1 - e^{-\left(\frac{X}{a}\right)^{\nu}}, \quad (18)$$

$$f(X) = \frac{\nu}{a} \left(\frac{X}{a}\right)^{\nu-1} \cdot e^{-\left(\frac{X}{a}\right)^{\nu}}, \quad (19)$$

де  $a$  і  $\nu$  – параметри закону (емпіричні коефіцієнти).

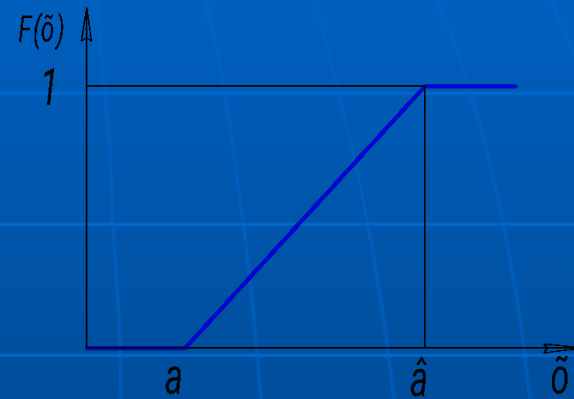
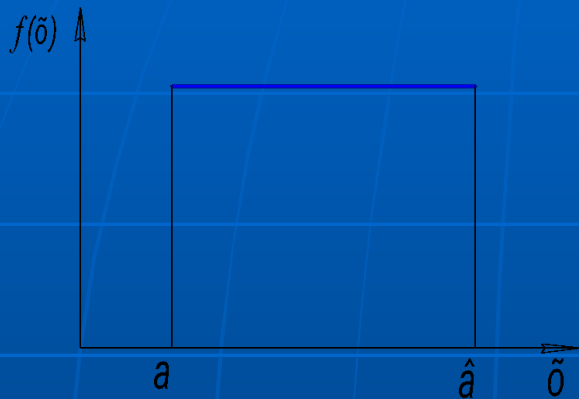


Використовують закон при  $0,4 \leq \nu \leq 0,9$

Використання закону в практиці технічної експлуатації :

- ресурсу деталей, що руйнуються внаслідок втомленості;
- напрацюванні до відмови кріпильних деталей;
- простоїв машин в поточному ремонті.

# Закон рівномірного розподілу



## Описання закону

$$f(X) = 0 \quad \text{при } X \text{ менше } a \quad (20)$$

$$f(X) = 0 \quad \text{при } X \text{ більше } a \quad (22)$$

$$F(X) = \frac{1}{v-a} \quad \text{при } a \leq X \leq v \quad (21)$$

$$F(X) = \frac{x-a}{v-a} \quad \text{при } a \leq X \leq v \quad (23)$$

Використання закону в практиці технічної експлуатації :

- часу простою технологічного обладнання, що вийшло з ладу, до початку його обслуговування, якщо замовлення протягом зміни обов'язково виконується;
- часу очікування маршрутного транспортного засобу.

# Закон Пуасона

$$P(X) = \frac{a^X}{X!} e^{-1}, \quad (24)$$

де параметр розподілу є математичним сподіванням випадкової величини,

$$a = m_x \quad (25)$$

Можна визначати імовірність потрапляння до вибірки  $n \leq 0,1N$ , де  $N$  – обсяг партії з  $X$  об'єктів з визначеною якістю, наприклад, некондиційних.

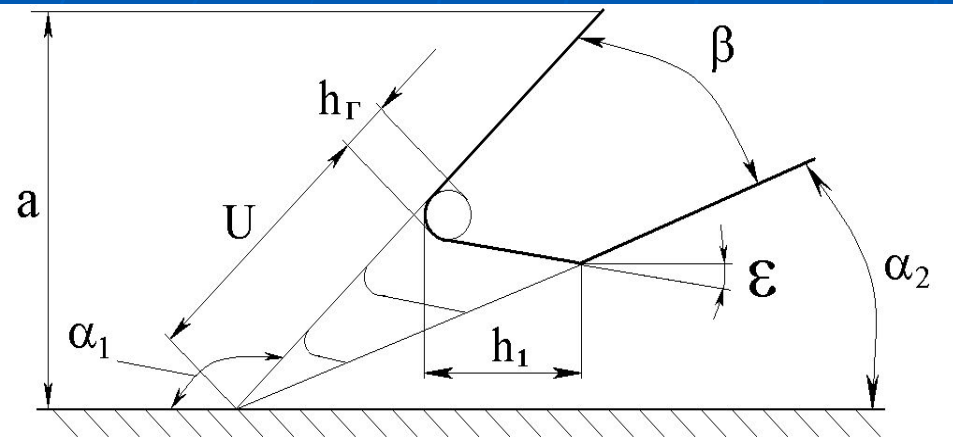
Використання закону в практиці технічної експлуатації :

- числа відмов для групи одночасно працюючих машин протягом встановленого терміну часу (або напрацювання);
- числа аварій або дорожньо-транспортних порушень;
- кількості клієнтів, що звертаються на пункт обслуговування в одиницю часу;
- кількості запасних частин, що забираються зі складу.

# 4. Моделі втрати працездатності машин

## Загальна модель втрати працездатності

Схема втрати працездатності лемеша плуга



Граничні значення  $h_{\Gamma}=3$  мм,  $h_1=9$  мм,  $\varepsilon=10^\circ$

Зміна показників глибини ріллі за часом роботи плуга

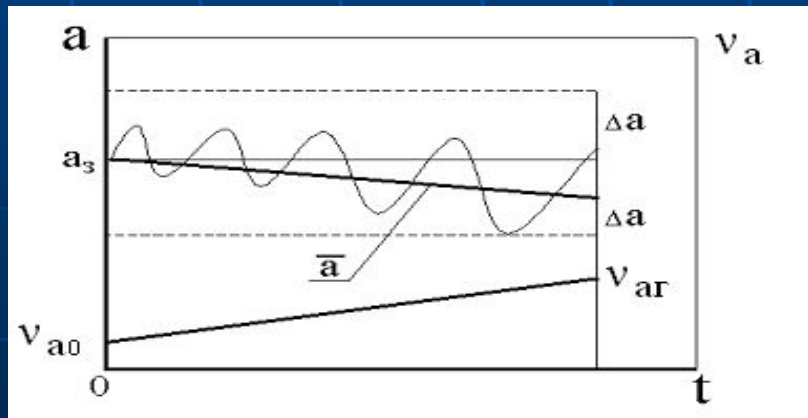
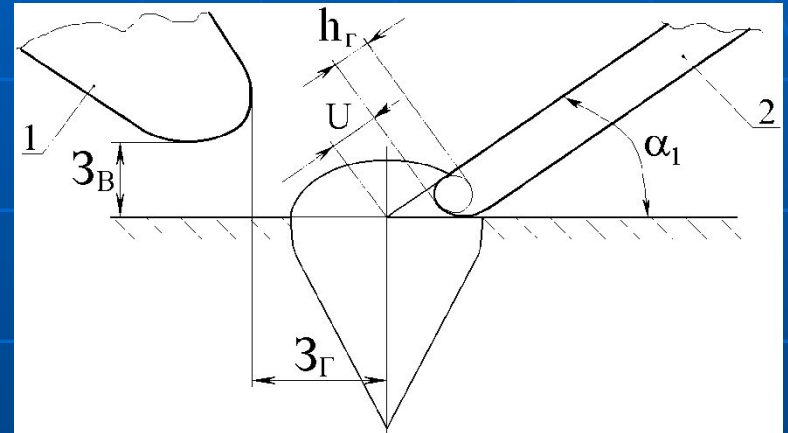
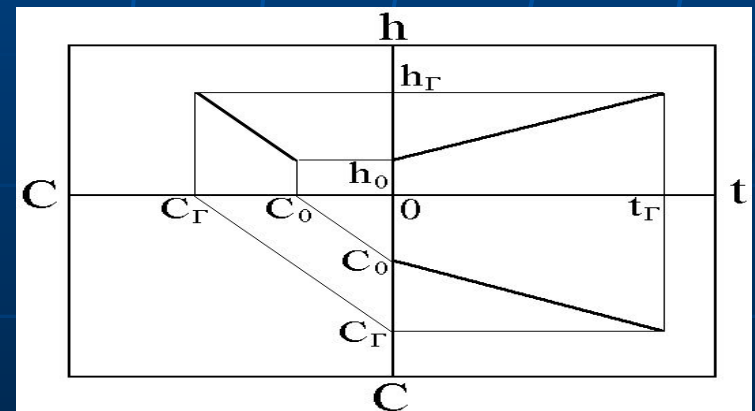


Схема зрізання коренеплоду ДИСКОВИМ НОЖЕМ



Граничні значення:  $D_{\Gamma}=380$  мм;  $h_{\Gamma}=0,7$  мм

Залежність зміни товщини леза ножа  $h$  за часом і збільшення сколів



# Втрата працездатності при поступових відмовах



$\Delta(t)$  - зазор між поверхнями тертя

$D(t)$  - розміри робочого органу

$U(t) = mt$  - знос робочого органу

де  $m$  - швидкість зносу робочого органу

$U(t) = U_{\Gamma}$  - відмова

Ресурс робочого органу

$$T = \frac{U_{\Gamma}}{m} \quad (26)$$

-  $\gamma$  % ресурс  $T_{\gamma}$ , при надійній імовірності

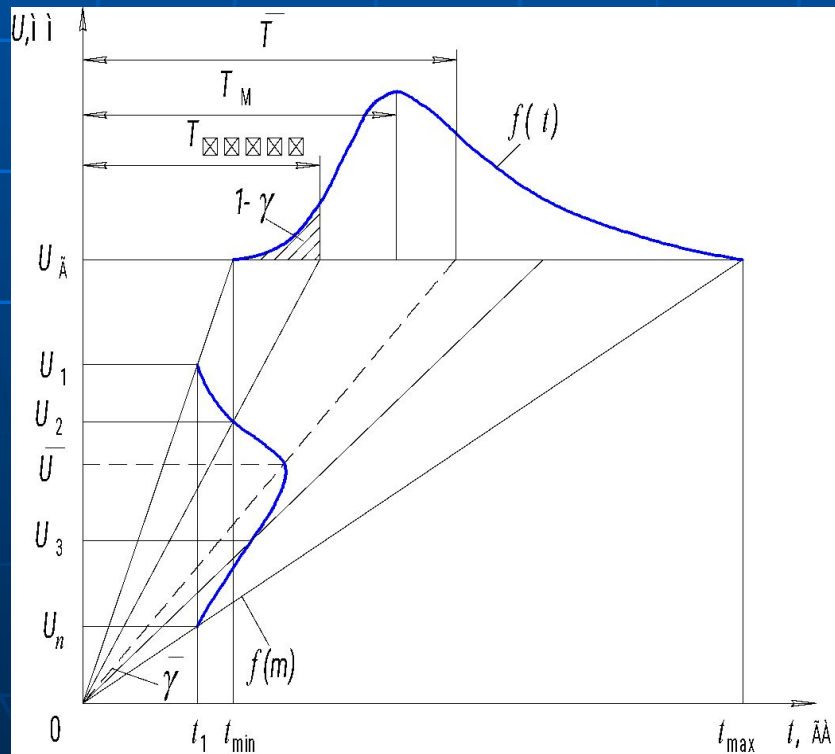
$$T_{\gamma} = \frac{U_{\Gamma}}{m + \sigma_m \text{arq}\Phi(\gamma)} \quad (27)$$

- найбільш імовірний (модальний) ресурс  $T_M$

$$T_M = \frac{U_{\Gamma} \bar{T}}{4\sigma_m^2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{\sigma_m}{m} \right)^2} - 1 \right] \quad (28)$$

- середній ресурс

$$\bar{T} = \frac{U_{\Gamma}}{m} \quad (29)$$





# Втрата працездатності при раптових відмовах

Умова безвідмовності

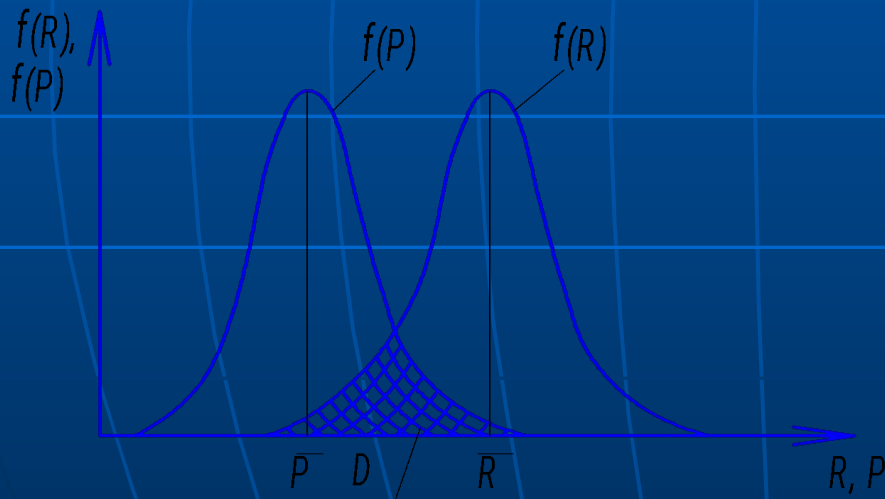
$$\Psi = R - P > 0, \quad (30)$$

$R$  – несуча здатність;  $P$  – значення зовнішніх сил

Запас міцності

$$K = \bar{R} / \bar{P}. \quad (31)$$

Модель відмови деталі при випадковому розподіленні  $R$  і  $P$



$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \exp\left[-\frac{(R-\bar{R})^2}{2\sigma_R^2}\right], \quad (32)$$

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left[-\frac{(P-\bar{P})^2}{2\sigma_P^2}\right]. \quad (33)$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$P_{\sigma} = \Phi\left(\frac{K-1}{\sqrt{K^2 v_R^2 + v_P^2}}\right), \quad (34)$$

де  $\Phi$  – нормована функція Лапласа;

$K$  – запас міцності;

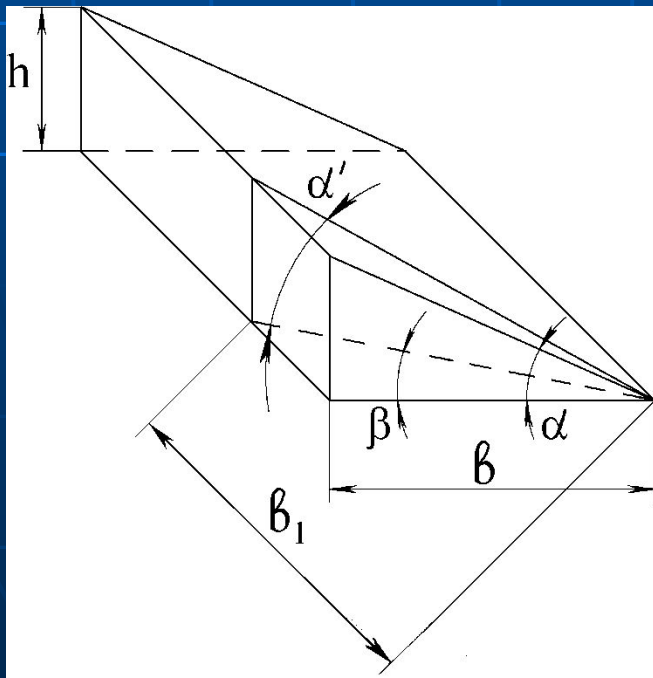
$v_R, v_P$  – коефіцієнти варіації несучої здатності  $R$  і зовнішніх сил  $P$

# 5 Конструкторсько-технологічні методи

## підвищення працездатності машин

- трансформація кута загострення для лезових робочих органів;
- створення попереднього навантаження протилежного за знаком з робочим навантаженням;
- резервування;
- управління спрацювання для утворення оптимальної форми робочого органу;
- мінімізація робочого опору за рахунок оптимізації форми робочого органу.

До визначення трансформованого кута загострення



$$\operatorname{tg} \alpha' = \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{Cos} \beta \quad (35)$$

$\operatorname{Cos} \alpha < 1$  то  $\alpha' < \alpha$

Для лез з обертальним рухом:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}, \quad (36)$$

$\lambda = V_0 / V_M$  — відношення обертальної швидкості леза до поступальної швидкості руху машини

$$V_0 \gg V_M \rightarrow \lambda \gg 1 \quad (37)$$

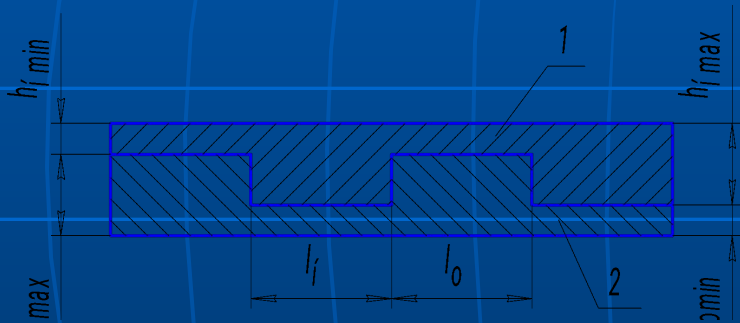
# Формування зубчастої поверхні

$$\frac{d\tau}{dS} = CP, \quad (38)$$

$\tau$  – лінійний знос перпендикулярний до робочої поверхні;

$S$  – шлях тертя;

$C$  – коефіцієнт зносу, що залежить від властивостей ґрунту і зносостійких властивостей матеріалу;  $P$  – сила тиску.



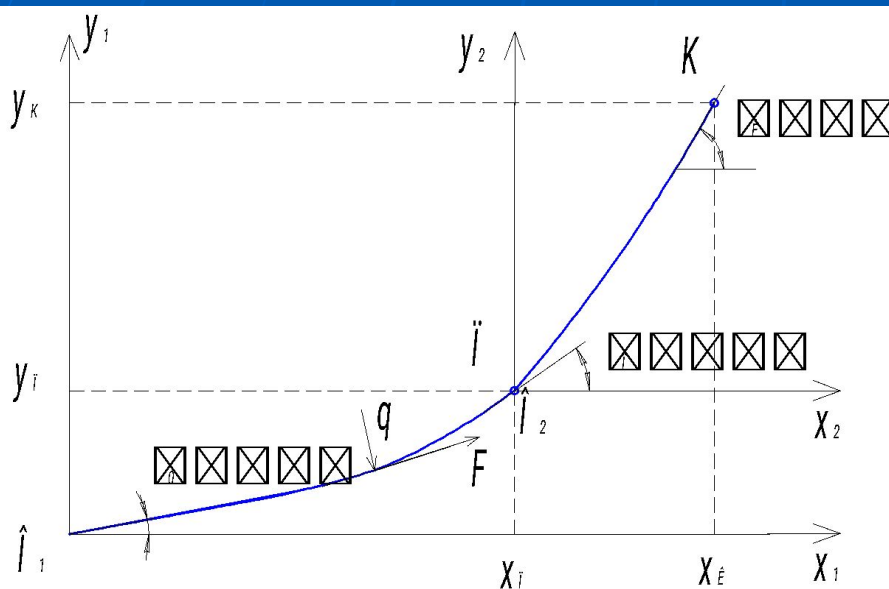
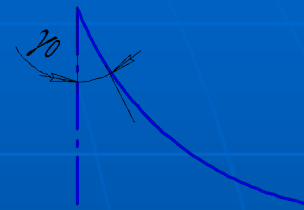
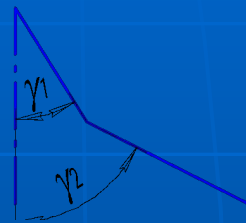
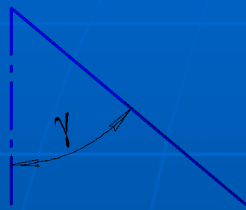
Інтенсивність формоутворення  
зубчастої поверхні леза

$$\xi = \frac{l_0}{\mu} \left( \frac{\frac{\varepsilon_0 h_{0 \max}}{\varepsilon_H h_{H \min}} l_H - \frac{\varepsilon_0 h_{0 \min}}{\varepsilon_H h_{H \max}} l_0}{\frac{\varepsilon_0 h_{0 \max}}{\varepsilon_H h_{0 \min}} l_H + \frac{\varepsilon_0 h_{0 \min}}{\varepsilon_H h_{H \max}} l_0} \right). \quad (39)$$

1 – наплавлений шар; 2 – основний шар



# Оптимізація форми леза лапи культиватора



Проекція сил на вісь OX

$$dR_X = (q \sin \gamma + F \cos \gamma) dl, \quad (40)$$

де  $dl$  – елементарна довжина леза стрілкової лапи;

$q$  – нормальна елементарна сила дії ґрунту на лезо;

$F$  – елементарна сила тертя леза з ґрунтом.

Виходячи, що  $\sin \gamma = \frac{y'}{\sqrt{1+y'^2}}$ ,  $\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1+y'^2}}$ ,  $dl = \sqrt{1+y'^2} \cdot dl$ . (41)

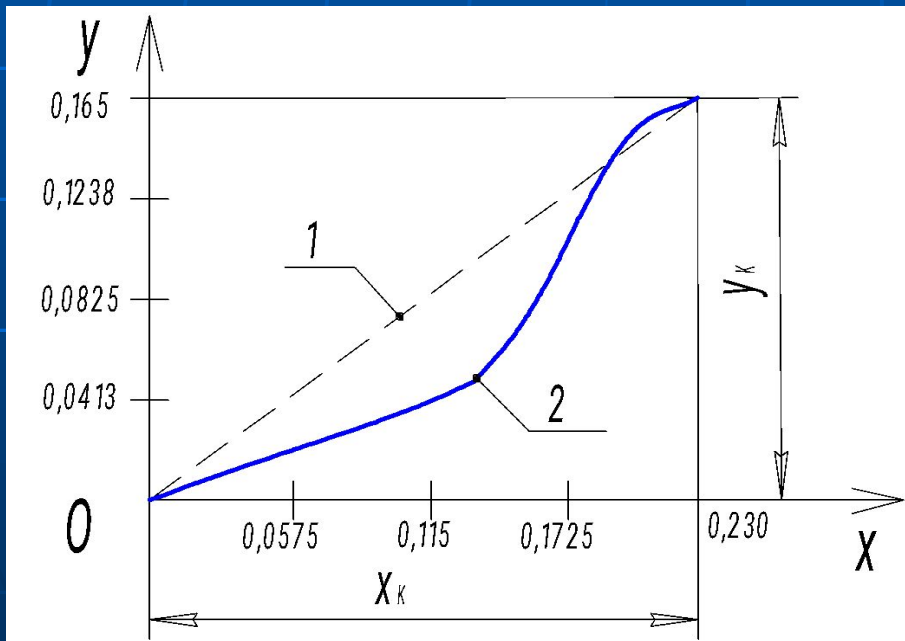
Енергетичний функціонал опору леза  $R_X = \int_0^{X_{II}} q(y' + f) dX + \int_{X_{II}}^{X_K} q(y' + f) dX$ , (42)

де  $a_1$  і  $a_2$  - постійні величини, які визначаються фізико-механічними властивостями ґрунту

$$q = a_1 + \frac{a_2 y'}{\sqrt{1+y'^2}}, \quad (43)$$

# Профіль леза лапи мінімальної енергоємності

$$y = \begin{cases} 0,36X + 0,78X^2 - 8,526X^3 + 60,01X^4; \\ \text{Для } 0 \leq X \leq X_{II}. \\ 1,145X - 117,041X^2 - 1142,1X^3 + 105095X^4; \\ \text{Для } X_{II} \leq X \leq X_K \end{cases} \quad (44)$$



1 – стандартної; 2 – мінімальної енергоємності