

Національний лісотехнічний університет України
Інститут деревооброблювальних технологій і дизайну
Кафедра технології меблів та виробів з деревини

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

**на тему : « Збільшення ресурсу роботи інструменту деревооброблювальних
рубальних машин »**

Виконав: студент VI курсу, групи ТД-62м
спеціальності 187 «Деревооброблювальні технології»

ОПП 187 «Технології виробів з деревини»

Магістр: Олійник Михайло Романович (підпис)

Керівник: _____ (підпис)

Рецензент: _____ (підпис)

м. Львів – 2024 рік

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| РЕФЕРАТ | 5 |
| Вступ | 7 |
| 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ДЕРЕВИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ З ТОЧКИ ЗОРУ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ | 8 |
| 1.1. Огляд локальних енергоресурсів..... | 8 |
| 1.2. Взаємозв'язок деревинних енергоресурсів та подрібнювального обладнання..... | 13 |
| 1.3. Проблематика рубальних машин. Природа тривкості лезвійного інструменту..... | 18 |
| 1.4. Надійність. Її прогнозування щодо обладнання для подрібнювання деревини..... | 20 |
| 1.5. Мета та задачі дослідження..... | 22 |
| 1.6. Висновки до розділу..... | 23 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 24 |
| 2.1. Аналіз вибраної методики для розрахунку довговічності на основі DM розподілу..... | 24 |
| 2.2. Визначення міцнісних показників елементів механізмів різання рубальних машин..... | 27 |
| 2.3. Визначення показників навантажуваності елементів механізмів різання рубальних машин..... | 28 |
| 2.4. Класифікація напружень робочого органу рубальної машини..... | 30 |
| 2.5. Висновки до розділу..... | 38 |
| 3. МАТЕМАТИЧНІ РОЗРАХУНКИ | 39 |
| 3.1. Визначення показників надійності складових механізму різання рубальної машини РМ-75..... | 39 |
| 3.2. Визначення показників надійності складових механізму різання рубальної машини РМ-110..... | 47 |
| 3.3. Формування потоку замін деталей рубальних машин..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.1. Визначення періодичності заміни (ремонт) барабанів рубальних машин..... | 56 |
| 3.3.2. Визначення періодичності заміни контрножів рубальних машин..... | 57 |
| 3.3.3. Визначення періодичності заміни сит рубальних машин..... | 58 |
| 3.3.4. Визначення періодичності заміни вальниць барабанів рубальних машин..... | 58 |
| 3.4. Висновки до розділу..... | 59 |
| 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 60 |
| 4.1. Зведені результати розрахованих показників надійності..... | 60 |
| 4.2. Зведені результати формування потоку замін деталей..... | 67 |
| 4.3. Розробка технологічного процесу відновлення деталей рубальних машин..... | 68 |
| 4.3.1. Технологічний процес відновлення барабана..... | 70 |
| 4.3.2. Технологічний процес відновлення сита..... | 71 |
| 4.4. Економічний ефект відновлення складових механізму різання рубальних машин..... | 71 |
| 4.5. Практичні рекомендації щодо експлуатування..... | 73 |
| 4.6. Висновки до розділу..... | 75 |
| Загальні висновки..... | 76 |
| Літературні джерела..... | 77 |
| Додатки..... | 79 |

РЕФЕРАТ

дипломної роботи на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня магістра
зі спеціальності 187 «Деревооброблювальні технології»
ОПП 187 «Технології виробів з деревини»

Олійника Михайла Романовича

на тему «Збільшення ресурсу роботи інструменту деревинопереробчих
рубальних машин»

Обсяг — 94 стор.; 23 ілюстр.; 17 табл.; 4 додатки; 20 джерел.

Ключові слова: надійність, енергетична тріска, статичне руйнування, ресурс роботи, практичні рекомендації.

Об'єкт дослідження: рубальні машини барабанного типу.

Предмет дослідження: показники надійності деталей та елементів механізмів різання рубальних машин.

Мета роботи: Збільшити ресурс роботи складових механізму різання рубальних машин на основі розрахунку їхніх показників надійності.

Методи дослідження: методи оброблення; методи математичного програмування; методи порівняння, прогнозування; методи математичної статистики.

Отримані результати: сформовано періодичність проведення замін чи ремонтів деяких деталей та елементів механізмів різання, визначено чинник, що

чинить найбільший вплив на довговічність деталей – експлуатаційні навантаження. Запропоновано дещо новий спосіб підготовки сировини перед подрібнюванням – змішування твердих і м'яких матеріалів в рівних пропорціях.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: розраховані показники надійності, а також дані залежностей деяких чинників можуть бути використані на деревообробних підприємствах та на виробництвах, що спеціалізуються на виготовленні обладнання для подрібнювання деревини.

Значущість роботи та висновки: впровадження результатів дослідження сприятиме підвищенню рівня ресурсоощадності, якості перероблення деревинних відходів та ефективності поводження з вторинними деревинними ресурсами.

Вступ

Робота більшості деревопереробчих підприємств по всій Україні зараз, в воєнні роки, вимагає ще більш оптимізаційних процесів виробництва та обладнання, а також раціонального використання деревини та деревинних матеріалів, ніж це було раніше. Попри це, як не крути, переробляння деревини продукує різноманітні відходи деревини та деревинних матеріалів. Деякі виробництва оптимізували відходи, шляхом подальшого їх використання у системах опалювання цехів, виробничих приміщень.

Одною з можливих сфер застосування деревинних відходів, окрім сировини для опалювання, є виробництво деревинних матеріалів. В залежності від якості таких матеріалів, основою для них може бути і масивна деревина у вигляді стовбурів дерев чи гілок, і кускові відходи деревопереробчих підприємств. Так чи інакше, для виготовлення виробу з деревинних матеріалів, необхідна технологія, яка крім ресерсоощадності передбачає і подрібнення сировини для повторного використання.

Існують вимоги, яким сировина, що підлягає використанню у деревинних матеріалах (технологічна тріска), має відповідати. Однією з таких вимог, є фракція, тобто розміри тріски. Між іншим, дана вимога стосується не тільки тріски для плитних матеріалів, а й тріски, що її використовують в ролі сировини для виготовлення паливних брикетів чи гранул.

Широкої популярності, в ролі обладнання для подрібнювання деревини, набули рубальні машини барабанного типу. В силу своєї простої конструкції та малої собівартості, вони є найбільш продуктивними з всієї різноманітності обладнання для подрібнювання деревини.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ДЕРЕВИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ З ТОЧКИ ЗОРУ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Огляд локальних енергоресурсів

На сьогоднішній день існує значна кількість енергоресурсів в цілому та деревинних енергоресурсів зокрема. У авторів [12] наведено основні осередки надходження сировини для подальшого її використання в ролі палива:

- Заготівля лісоматеріалів та проріджування лісів;
- Деревинообробна промисловість;
- Деревина та стеблові матеріали з ландшафтної рослинності;
- Сільське господарство;
- Раніше використана, утилізована деревина.

Велика частка сировини для палива продукується саме під час заготівлі лісоматеріалів. Після повалення дерева, в ґрунті залишається коренева система, яка підлягає подальшому видаленню та переробленню в паливо. Що стосується відходів в вигляді тирси - незначний внесок, з точки зору раціонального використання деревини, внесло впровадження в технологічний процес стрічкочіпкових верстатів. Вони замінили громісткі пилорами, які крім значно потужніших двигунів, використовували постави з рамних пил, мінімальна товщина яких складала 3...3,5 мм, тоді як товщина пропилу стрічкової пилки, залежно від виду - 1,2...2,8 мм. Попри це, крім тирси, в відходи все ще потрапляють периферійні округлі частини колод (обаполи) [20], рис.1.1.

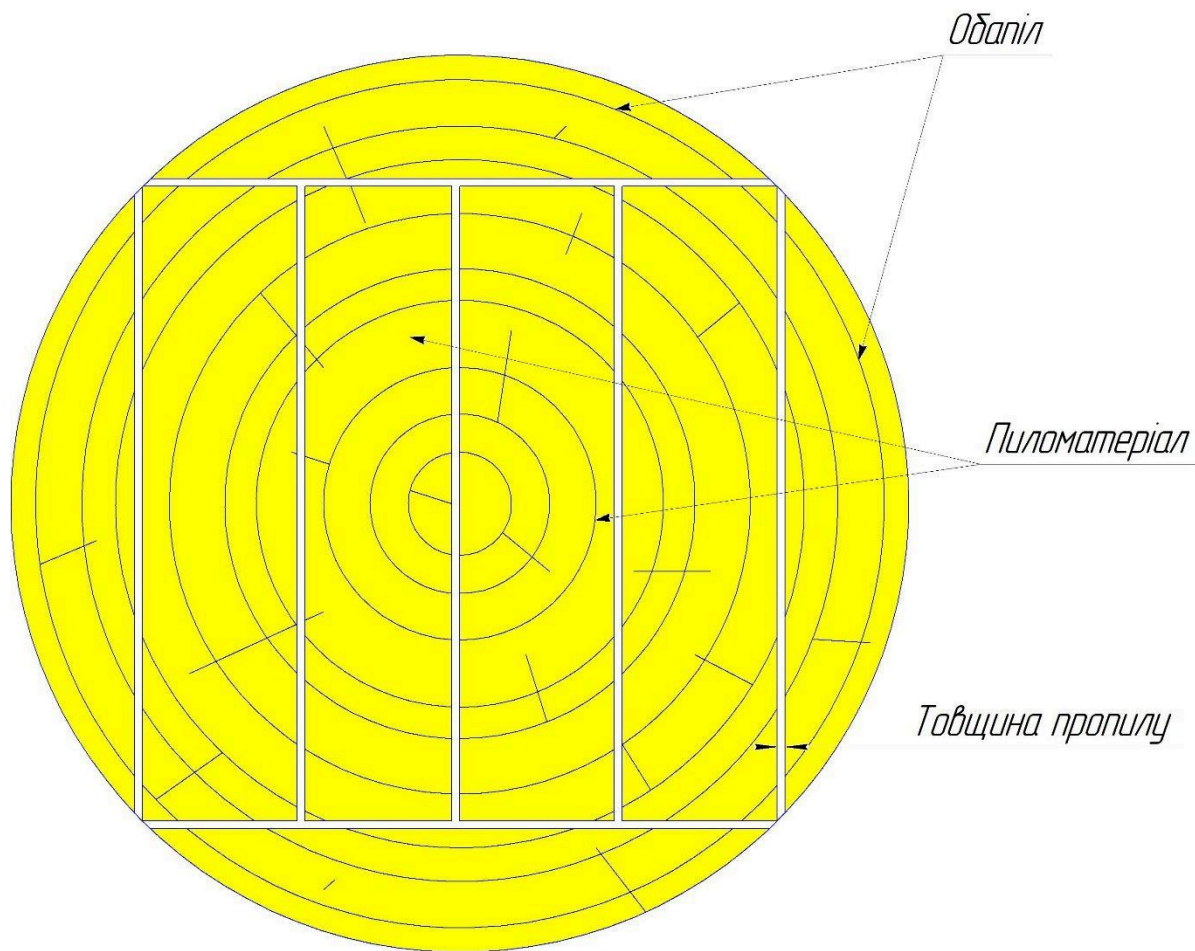


Рисунок 1.1 – Схема утворення відходів при заготівлі пиломатеріалів

Технологічний процес виготовлення паливної сировини полягає в наступному. Деревина заготовляється в лісі і стає придатною для подальшого використання у вигляді готових до спалювання колод або тріски в ланцюжку робочих етапів, що їх наведено нижче, (деякі з цих етапів виконуються в різному порядку) [12]:

- Вирубка лісу;
- Збирання деревини;
- Сушіння;
- Зберігання необробленої сировини;
- Подрібнення (пилами, древоколами або рубальними машинами);

- Транспортування до кінцевого або проміжного сховища;
- Зберігання готового палива.

У цій технологічній послідовності збирання деревини, як правило, зумовлює значне збільшення витрат. Більші дистанції між зонами збирання допустимі лише в тому випадку, коли гілля з вирубки транспортується до місця обробляння разом з деревиною, перед відокремленням її від стовбура. Відстані, що перевищують 40 - 50 метрів економічно не доцільні, особливо на крутій місцевості. Однак, якщо розділення гілля від стовбура відбувається на місці лісозаготівлі, то масивна сировина, наприклад колоди, також обробляються там само. Відходи лісозаготівлі або цілі дерева також мають бути переміщені (тобто перевезені) на трелювальній машині або лісовозами, особливо якщо вони підлягають подальшому подрібнюванню на тріску [12].

Власне збирання деревини, її підтягування, здійснюється або вручну, або за допомогою тросової лебідки. При ручному способі, відстань для першого проріджування ледь перевищує 20 метрів. При проріджуванні в старих деревостанах, вага не подрібненої деревини зростає настільки, що її можна тягнути лише лебідкою, або машинами. Сучасні лісозаготівельні машини, харвестерні машини, які зазвичай використовуються для обробляння промислової деревини, можуть також використовуватися для заготівлі дров. Виліт стріли крана таких машин становить близько 10 метрів. Варто зазначити також, що зусилля, затрачені при деревинозаготівельному процесі напряду залежать від породи деревини, віку деревостану, механізації праці, рельєфу місцевості та кваліфікації робітників. Продуктивність праці коливається в межах від 0,2 до 1,4 м³/год. Середнє значення становить приблизно 0,8 кубічних метрів (з корою) на людино-годину [12].

Цілісна сировина. Цілісна деревинна сировина, у вигляді колотих дров або чурпаків, заготовляється або лісогосподарським підприємством, або приватними користувачами, які можуть бути кінцевими споживачами. Зазвичай, це частково перероблене паливо (наприклад, розколоті або нерозколоті метрові

або двометрові колоди). Це, зазвичай, здійснюється за допомогою сільськогосподарської техніки. Комерційні постачальники, зазвичай, розпилюють і розколують деревину безпосередньо перед продажем. Це означає, що вимоги до відповідних типів котлів, в яких потім спалюють сировину, можуть бути індивідуальними. Зазвичай, таку сировину постачають у вигляді дров довжиною 25, 33, 50 і 100 см, але переважають заготівки довжиною 33 см. Для кінцевого споживача сировина доступна готова до розпалювання в сипучому або фасованому вигляді, в контейнерах або запаїні у плівці на одноразових піддонах об'ємом близько 2 м^3 кожен. Кускова деревина також може бути обв'язана пластиковими стрічками для формування пачок по одному кубічному метру для зручності завантаження і переміщення маніпулятором або навантажувачем.

Паливна тріска. Перероблення паливної (енергетичної) тріски передбачає декілька процесів, які відрізняються головним чином ступенем механізації: ручні, частково механізовані та повністю механізовані процеси. Заготівля такого виду палива прогнозує використання певних сортamentів деревини, наприклад тільки залишків або стовбура, або ж можлива повна утилізація деревини. Перед переробкою, зрубані суцільні дерева або їх рештки повинні залишатися в деревостані або на лісосіці протягом декількох місяців, поки не опаде хвоя та листя. В іншому випадку це призведе до збільшення вмісту води, що в подальшому сприятиме утворенню грибкових спор під час зберігання тріски. Крім того, хвоя та листя містять відносно велику кількість поживних речовин, які не слід вивозити з лісової території. Перевага такого проміжного зберігання після вирубки полягає ще й в тому, що деревина висихає в листяному стані швидше, ніж після його скидання, оскільки значна частина води виділяється через хвою та листяну масу. Однак у випадку з хвойною деревиною ця процедура може призвести до проблем із захистом лісу в літні місяці (можливе зараження короїдами). Якщо великі обсяги деревини мають зберігатися тимчасово, вирубку слід проводити восени, оскільки до весни деревина достатньо висохне, щоб запобігти зараженню. Заключною

технологічною операцією з виготовлення паливної тріски є процес гранулювання подрібненої сировини. Як правило гранулювання відбувається на спеціалізованому обладнанні, яке забезпечує вихід паливних пелет необхідних параметрів. Далі – фасування і продаж.

Остаточна організація логістичного ланцюга в основному визначається вибором методу заготівлі та переробки. Їх різноманітність призводить до великої кількості можливих технологічних послідовностей. На рис. 1.2 [12] наведено кілька прикладів таких технологічних шляхів.

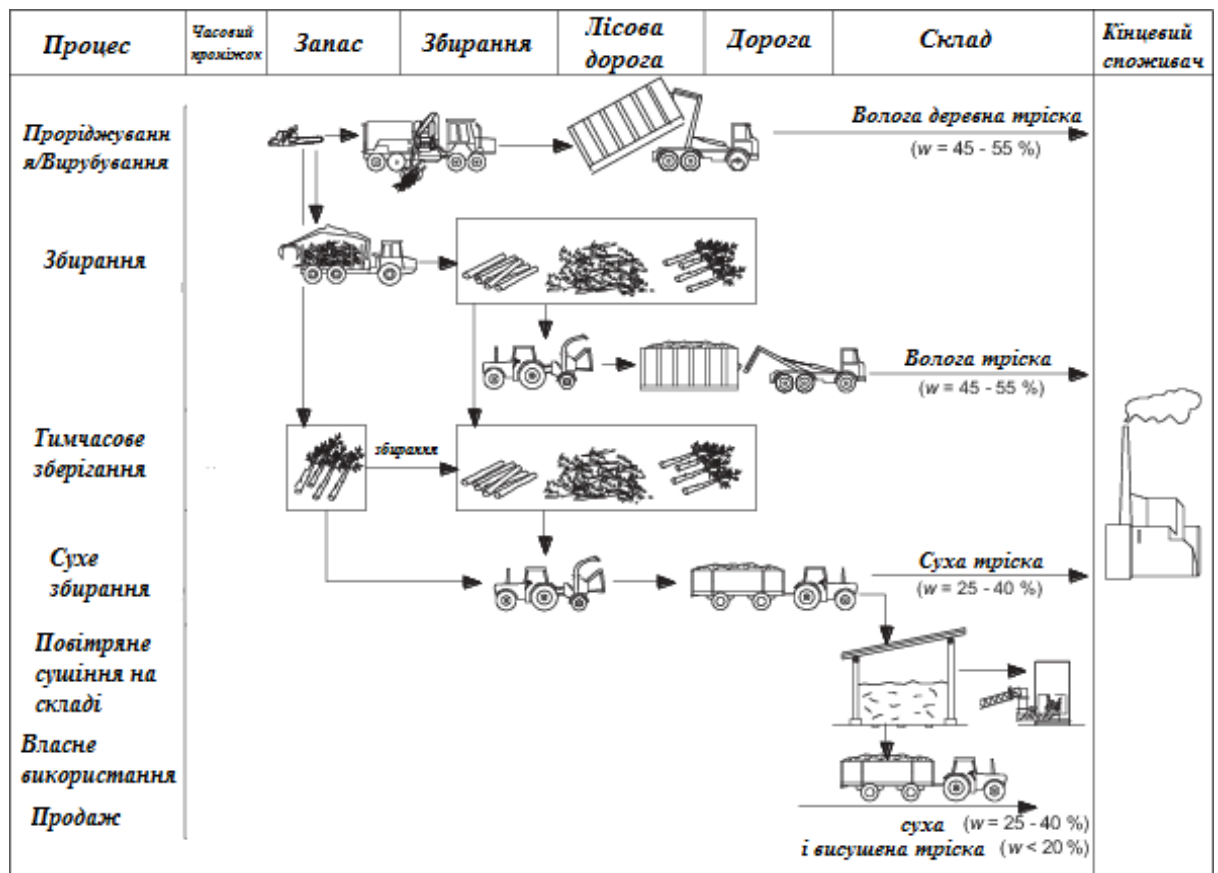


Рисунок 1.2 – Схема технологічного процесу виготовлення паливної сировини

Аналізуючи рисунок 1.2, можна зауважити як змінюється ланцюг технологічної операції від виду кінцевого продукту, а також яке обладнання бере участь у виготовленні паливної сировини.

Іншим значним джерелом сировини є відходи деревообробних виробництв, спеціалізованих виробництв. Виготовляючи певні вироби,

підприємство подрібнює кускові відходи на стаціонарному обладнанні, або за відсутності такої можливості, наймає підрядників, що виконують дану роботу на мобільних установках. Відходи попередньо окореної деревини, мають дещо більшу вартість, ніж відходи з елементами кори [12].

В Україні збут підприємством деревинних відходів дещо ускладнений, оскільки підрядні компанії приймають відходи не менше заданого об'єму. Проте існують підприємства, які попри виготовлення основної продукції, займаються виготовленням паливних брикетів з деревинних відходів, або використовують тирсу та кускові відходи для опалювання цехів.

Що стосується палива з сільськогосподарської галузі, тут воно може виготовлятися як побічний продукт, або може вирощуватися спеціально як енергетична рослина [12]. У ролі енергопродукту використовується ріпак або кукурудза. Під час переробляння ріпаку, його більша частина перетворюється на паливо (метиловий ефір з ріпакової олії в ролі біодизелю). Кукурудзяний силос, же, використовується для виробництва біогазу.

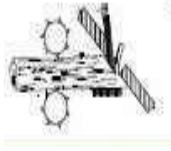
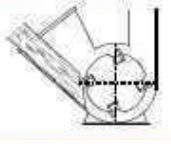

1.2. Взаємозв'язок деревинних енергоресурсів та подрібнювального обладнання

З розглянутого вище, спадає на думку, що будь-яка сировина напяму пов'язана з подрібнювальним обладнанням, оскільки повинен забезпечуватись чітко визначений розмір (фракція) подрібненої продукції для можливості її подальшого брикетування. Проте деревинна сировина може проходити кілька циклів подрібнення, для забезпечення потрібної якості. Забігаючи наперед, варто зазначити, що для вирішення цієї проблеми (необхідності поступового подрібнення), вже проходить процес попередніх досліджень українськими здобувачами освіти, аспірантами.

На сьогоднішній день існує різноманітна кількість видів подрібнювального обладнання. Кожен з них володіє своїми перевагами та недоліками. В таблиці 1.1 наведено деякі типи мобільних подрібнювачів та їхні технічні особливості [12].

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика рубальних машин дискового, барабанного та шнекового типів [12]

| Тип машини | Різальний інструмент | Вид подавання | Максимальний діаметр колоди, мм | Товщина зрізуваного шару, мм | Потужність, кВт | Продуктивність, м ³ /год |
|--|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|  дискового | 1-4 ножів | Гравітаційне; механічне | 100-300 | 4-80 регулювана | 8-105 кВт | 2-60 м ³ /год |
|  барабанного | 3-20 ножів | Гравітаційне; механічне | 80-450 | 5-80 регулювана | 45-325 кВт | 5-100 м ³ /год |
|  шнекового | Спіральний ніж (шнек) | Механічне (самозатягування) | 160-270 | 20-80, залежить від кроку шнека | 30-130 кВт | 5-40 м ³ /год |

В основному використовують подрібнювальне обладнання такого типу: (рис. 1.3 – 1.5). Існує ще один тип – молоткові подрібнювачі (рис. 1.6). Проте їх призначення – повторне подрібнювання сировини визначених параметрів.



Рисунок 1.3 – Рубальна машина дискового типу [12]

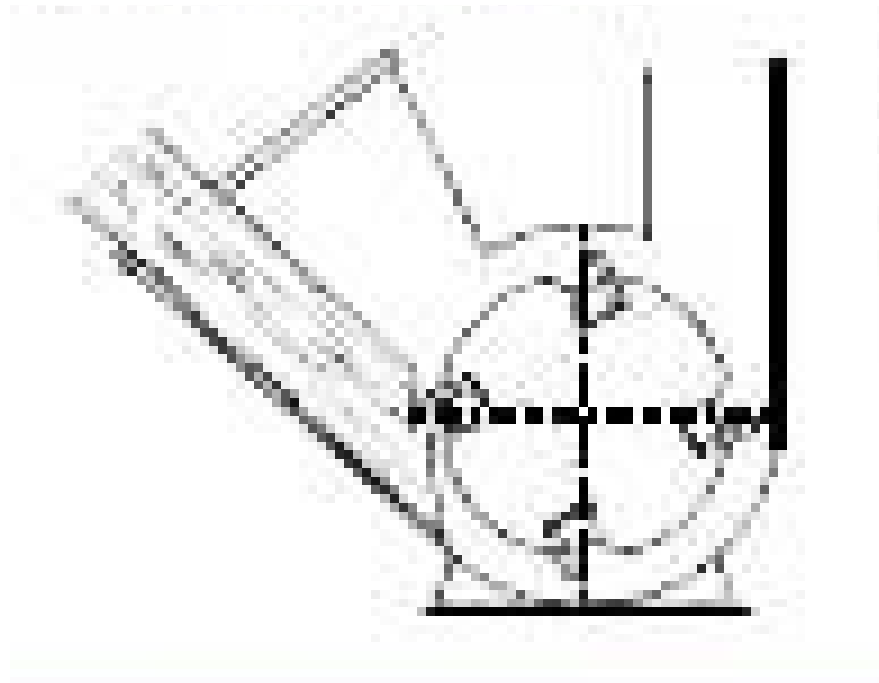


Рисунок 1.4 – Рубальна машина барабанного типу [12]

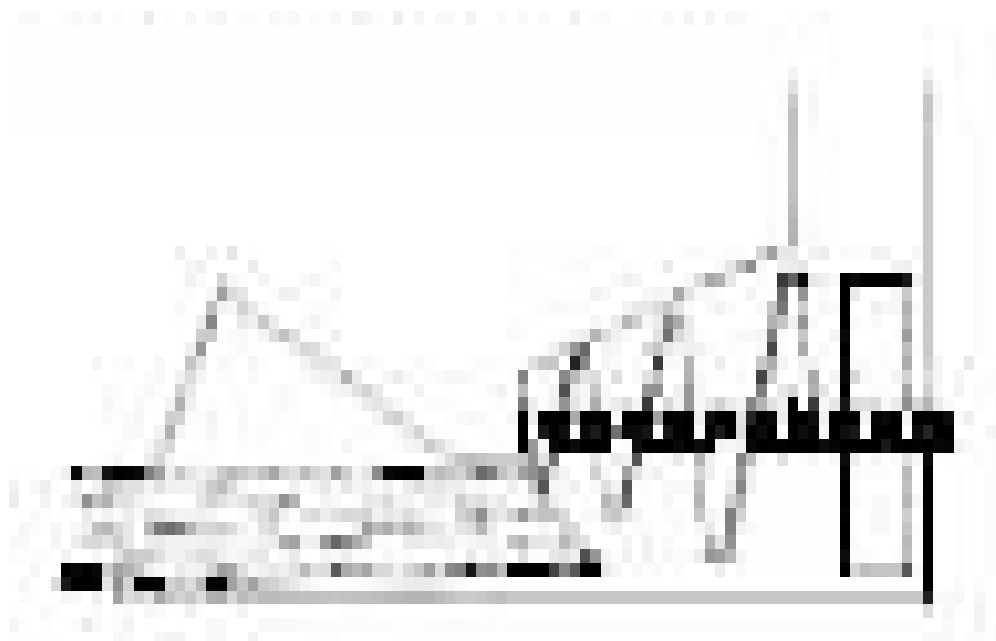


Рисунок 1.5 – Рубальна машина шнекового типу [12]

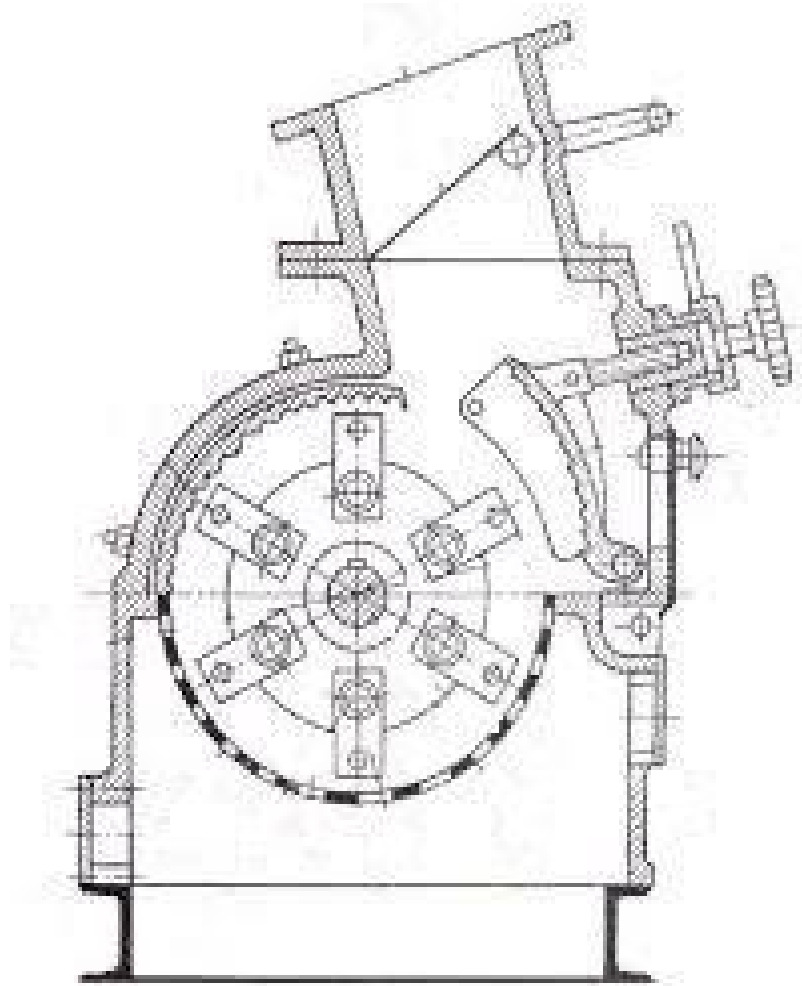


Рисунок 1.6 – Молоткова дробарка [2]

За даними таблиці 1.1 видно, що найпродуктивнішими серед всіх є машини барабанного типу, до того ж, вони можуть подрібнювати колоди діаметром до 450 мм, що значно перевищує показники інших типів.

На сьогоднішній день, незважаючи на постійні дослідження та удосконалювання, одною з основних проблем рубальних машин в цілому є незначний період тривкості різального інструменту [16]. Крім цього існують і інші чинники, що впливають на тривкість інструменту та загалом на показники надійності елементів механізму різання рубальних машин (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема джерел та чинників, які чинять вплив на показники надійності вузлів та деталей рубальних машин

На рис.1.7 виділено три основних чинники, які беруться до уваги у наших розрахунках: навантаження на систему ВІД, перервне різання та постійне різання. Дані чинники вибрані тому, що джерелами їх виникнення є верстат та режим різання. Саме до складу цих джерел і відносяться деталі та елементи, показники надійності яких ми визначаємо.

1.3. Проблематика рубальних машин. Природа тривкості лезвійного інструменту

Як вже зазначалося вище, основна проблема обладнання для подрібнення деревини полягає у недостатньому періоді тривкості інструменту – ножів та контрножів. Зумовлено це тим, що ножі, попри свою достатню твердість,

володіють низькою жорсткістю різальної крайки, оскільки кут загострювання складає $\beta = 30-50^\circ$, а радіус заокруглення різальної крайки $\rho = 6...10$ мкм. Разом з тим різальна крайка отримує навантагу від рубання, та першою контактує з усіма сторонніми включеннями, що можуть бути наявними в сировині.

Автори [16], стверджують, що на тривкість інструменту впливає і пропарювання деревини (особливо бука). Аргументується це тим, що в процесі пропарювання, проходять хімічні перетворювання, які в подальшому спричинюють виникнення абразивних неорганічних речовин, а пропарена деревина, точніше її відходи, можуть бути подрібненими для подальшого брикетування. Підсумовуючи вище зазначене, варто зауважити, що різальний інструмент рубальних машин зокрема, повинен бути стійким ще й до дії абразивних речовин та дії агресивного середовища (окиснення, корозія, тощо).

Разом з тим, проводилися дослідження [16], щодо зміцнювання ножів, та ефективності їх подальшої роботи. Під час визначення тривкості ножів критерієм було прийняте поняття спрацювання ножів по задній поверхні [16]. В таблиці 1.2 наведені значення, що характеризують спрацювання леза ножа по задній поверхні від кількості обробленої деревини для різних марок сталі.

Таблиця 1.2

Спрацювання леза різця [16]

| Марка сталі | Кількість обробленої деревини / м. п. | | | | |
|-------------|---------------------------------------|-----|-----|------|-------|
| | 250 | 500 | 750 | 1000 | 2500 |
| | Дуб | | | | Сосна |
| У8А | 49 | 82 | 83 | 112 | 90 |
| У10А | - | - | - | - | 80 |

| | | | | | |
|------|------|------|----|-----|----|
| ХВГ | 42,5 | 62,5 | 86 | 102 | 90 |
| 9ХС | 38,2 | 47,2 | 85 | 94 | 75 |
| Х12М | 7,4 | 14,8 | 19 | 23 | 30 |

Як видно з таблиці 1.2 збільшення вмісту вуглецю на пряму впливає на тривкість інструменту. Зі збільшенням твердості сталі спрацювання ножів зменшується.

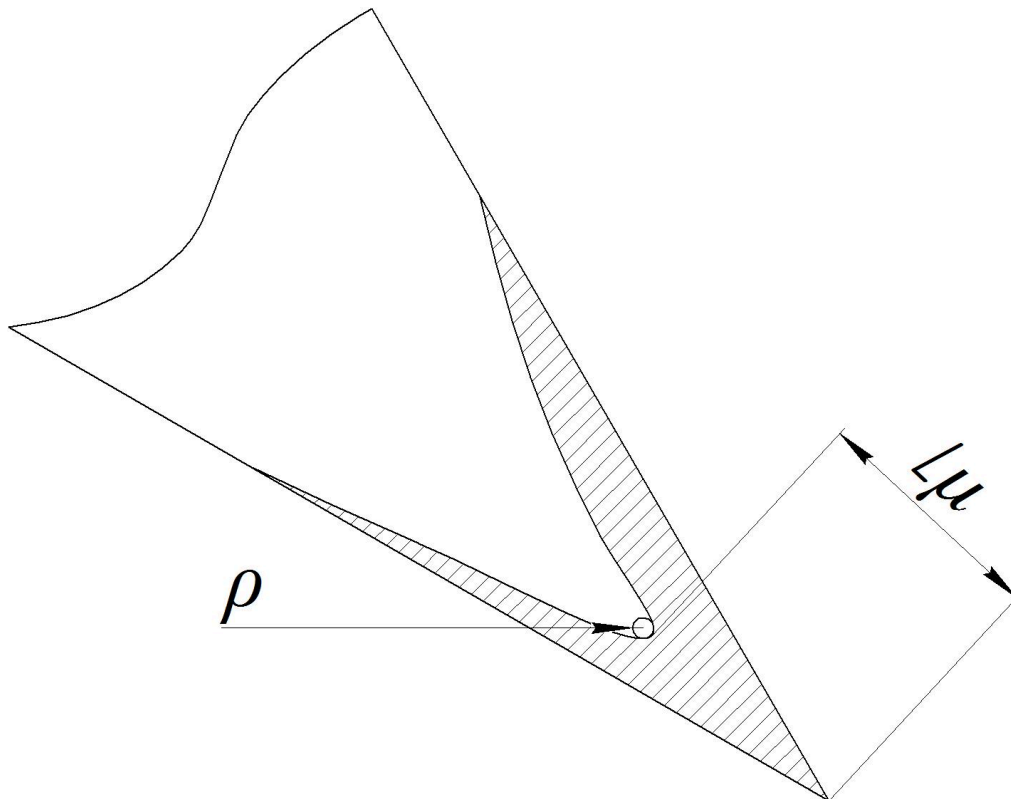


Рисунок 1.8 – Схема затуплення леза ножа

На рис. 1.8 показано відповідні параметри [16], якими характеризується зношування ножів. $L\mu$ - відносне вкорочення леза; ρ - радіус заокруглення різальної крайки.

1.4. Надійність. Її прогнозування щодо обладнання для подрібнювання деревини

Згідно ДСТУ 2860-94, «Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об'єкта і умов його застосування, може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей» [17, с. 4]. Показники надійності поділяються на дві групи: вироби, які підлягають ремонту та вироби, які не підлягають ремонту.

Для того, щоб розрахувати значення показників надійності, тих виробів, які не є ремонтпридатними, проводять випробовування кількості виробів N і через рівні проміжки часу ($\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_n$) фіксують кількість відмов ($\Delta m_1, \Delta m_2 \dots \Delta m_n$) або наробіток на відмову, тобто час, за котрий виріб працював до настання відмови ($t_1, t_2 \dots t_n$). Завдяки знайденим результатам, можна визначити будь-які показники: частоту відмов (f_i), густину розподілу ймовірностей ($f(t)$), закон розподілу ймовірностей ($y=f(t)$), інтенсивність відмов (λ_i), ймовірність безвідмовної роботи ($R(t)$), гамма відсотковий ресурс (t_γ), середнє напрацювання до відмови (t_{cp}) [4].

В свою чергу обладнання для подрібнення деревини належить до тих виробів, ремонт яких можливий та передбачений. Замінивши конкретну деталь, або їх комплект, виріб продовжує експлуатуватися. Для даного типу виробів доводиться окремо виділяти середнє напрацювання для кожної з відмов: окреме для першої відмови, окреме для другої і так далі. Різниця між середніми напрацюваннями полягає у тому, що після заміни виробу, інші, ті які працювали, експлуатуються й надалі, а тому зазнають більш вагомшого «постаріння». Це приводить до того, що середнє значення до другої відмови буде меншим, ніж середнє напрацювання до першої. В подальшому, коли «старші» ланки будуть замінені на нові, середній час між відмовами врегулюється і дещо зростатиме [4].

У відповідність з ДСТУ 2862-94 [18] розглядають наступну вихідну інформацію, що її використовують для визначення надійності машин: різноманітна конструкторська (проектна) документація на різних етапах конструювання виробу; архів даних про аналогічні вироби, що містить в собі

статистичні дані про експлуатаційну надійність; архів даних про випробовування, що містить інформацію про напруженість деталей і складальних одиниць; довідкові дані про показники надійності електро – радіовиробів та інших компонентів; інформація про умови експлуатації та режими навантажування. Існує чотири методики визначення надійності, залежно від об'єму вихідних даних та ступеня складності об'єкта [18, п. 4.10]:

- Розрахунок показників надійності за відомими функціями розподілу напрацювань до відмови (ресурсу, терміну служби, терміну зберігання та тривалості відновлювання);
- Розрахунок показників надійності на основі аналізу фізичних процесів деградації об'єкта;
- Розрахунок показників надійності на основі міцнісних характеристик матеріалу деталей і умов їх навантаження під час експлуатації;
- Розрахунок показників надійності об'єктів за відомими значеннями показників надійності їх складових частин.

У [18, п. 4.11] наводять наступний загальний порядок розрахунку надійності: «ідентифікація об'єкта, яка полягає у встановленні вмісту, структурної схеми надійності, вимог експлуатування, навантаг, характеристик міцності, мірила відмов (критичного та граничного станів) виробу та його складових, методики технічного обслуговування та ремонту; розрахунок показників надійності складових частин виробу за допомогою довідкових даних, чи встановлених у ДСТУ 2862-94 методів; розрахунок показників надійності в цілому на основі ДСТУ 2862-94». Зазначається, що результати обчислень подають в вигляді пояснювальної записки, або окремого звіту. «Також результати мають містити: ідентифікацію виробу, мету та методику, розрахункові значення показників надійності, висновок про відповідність результатів встановленим вимогам, рекомендації щодо гарантування заданого рівня надійності» [18, п. 4.12].

1.5. Мета та задачі дослідження

Мені випала нагода ознайомитися з виробництвом ТОВ «Technopark», яке спеціалізується на виготовлянні обладнання для подрібнення деревини, а також надає послуги з металообробляння. Одною з характерних рис даного виробництва є впровадження нових технічних рішень в конструкцію своїх виробів. До таких виробів належать і рубальні машини барабанного типу, що виготовляють на ТОВ «Technopark». Під час ознайомлення з підприємством в цілому, та з рубальними машинами зокрема, було виявлено відсутність на виробництві будь-яких даних щодо показників надійності рубальних машин барабанного типу, в тому числі і відсутність інформації про міцнісні характеристики матеріалів деталей вузлів машин, та умов їх навантаження. Тому виникли вагання в ремонтпридатності та в забезпеченні ресурсом деяких окремих деталей вузлів машини, що привело до ідеї проведення розрахунків показників надійності.

В результаті аналізу оцінки вихідних даних щодо міцнісних характеристик матеріалу деталей і умов їхньої навантаженості, визначено мету та завдання дослідження:

Мета дослідження: Збільшити ресурс роботи складових механізму різання рубальних машин на основі розрахунку їхніх показників надійності.

Завдання дослідження:

- Встановити залежність середнього ресурсу T_{cp} та гамма-відсоткового ресурсу T_{γ} , в певних межах довірчої ймовірності, від коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування деталей та діючих на них навантажень;
- Сформулювати потік замін деталей та запасних частин рубальних машин;
- Дати практичні рекомендації, стосовно використання, для конкретної рубальної машини.

1.6. Висновки до розділу

1. На основі вітчизняної та зарубіжної літератури, проаналізовано основні джерела отримання сировини для виготовлення палива, а також наведені порівняння організації збуту деревинних відходів в Україні. Деревинні енергоресурси як і сировина в цілому, прямо пов'язані з обладнанням для подрібнювання, оскільки подрібнення – одна з основних технологічних операцій при виготовлянні більшості паливної продукції.

2. Значною проблемою є невисокий період тривкості різального інструменту, який напряму залежить від твердості сталі та вмісту в ній вуглецю. Станом на зараз проводяться активні дослідження щодо збільшення періоду тривкості ножів рубальних машин.

3. Обраний нами метод визначення показників надійності деяких деталей механізму різання рубальних машин базується на відомих даних міцнісних характеристик матеріалу деталей і умов їх навантаження.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Аналіз вибраної методики для розрахунку довговічності на основі DM розподілу

Надійність розраховуємо для барабанів двох рубальних машин барабанного типу різної продуктивності. Обрана нами методика визначення надійності – «Метод розрахунку надійності на основі міцнісних характеристик матеріалу деталей і умов їх навантаження під час експлуатування» [18, п. 4.10], проводиться для розрахунку довговічності деталей машин на основі наведених нище характеристик:

на основі міцнісних характеристик матеріалу деталей:

- границя витривалості [$\sigma_{id}(T_{id})$];
- показник степеня кривої втоми [$T_a(T_i)$];

на основі характеристик навантажуваності деталей:

- максимальна амплітуда напружень [$\sigma_{amax}(t_{amax})$];
- коефіцієнт варіації цієї амплітуди [V_i];
- абсциса точки зламу кривої втоми [N_d].

У зв'язку з відсутністю інформації щодо цих показників на виробництвах, нами вирішено їх визначити за допомогою емпіричних залежностей з курсу «Деталі машин» та «Опір матеріалів». Довговічність характеризується трьома параметрами, які повинні бути визначені [18, дод. Д]: середній ресурс [T_{cp}], гамма – відсотковий ресурс [T_v], коефіцієнт варіації ресурсу [$K_\phi(T)$].

Середній ресурс [T_{cp}], знаходимо за формулою:

$$T_{cp} = \mu(1 + v^2/2) \quad (2.1)$$

де μ - параметр масштабу розподілу ресурсу деталі;

v – коефіцієнт варіації ресурсу при врахуванні множини незалежних процесів;

1, 2 – сталі доданок та дільник відповідно.

Гамма – відсотковий ресурс $[T_y]$:

$$T_y = \mu \left[1 + \frac{v^2 u_p^2}{2} - v u_p \left(1 + \frac{v^2 u_p^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.2)$$

або

$$T_y = T_{\text{ср}} + x * \sigma \quad (2.3)$$

де u_p – квантиль нормального розподілу;

x – квантиль, що залежить від довірчої ймовірності, для $\gamma=90\%$, $x=-1.281$, для $\gamma=95\%$, $x=-1.64$, для $\gamma=99\%$, $x=-2.32$.

Дані значення квантилей визначалися в середовищі EXcel (див. додаток Г).

Коефіцієнт варіації ресурсу $[K_\phi(T)]$:

$$K_\phi(T) = v(4 + 5v^2)^{\frac{1}{2}} / (2 + v^2) \quad (2.4)$$

Спершу [18], визначаємо коефіцієнт $K_{\text{реж}}$, який враховує умови навантажуваності:

$$K_{\text{реж}} = \frac{a_p}{a_T} \quad (2.5)$$

де a_p – робочий режим;

$$a_p = 1 + v_o^2 u_p^2 * 2 - v_o^2 u_p \left(1 + \frac{v_o^2 u_p^2}{4} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

$$a_T = \frac{a_p}{2} \left\{ \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(m-1+i)! v_o^{2i}}{i!(m-1-i)! 2} + \sum_{i=0}^m \frac{(m+i)! v_o^{2i}}{i!(m-i)! 2} \right\} \quad (2.7)$$

де m – параметр кривої, $m=3$;

i – інтенсивність зношування;

v_o – коефіцієнт варіації амплітуд напружень;

Згідно [4], інтенсивність зношування i можна визначити різними способами в залежності від зовнішніх умов: коли відоме лінійне зношування деталі; в залежності від тиску в парах що контактують; за наявності абразивних частинок в зоні тертя. В нашому випадку розрахунок проводимо, виходячи з тиску в парах тертя:

$$i = k_4 \frac{p^* f}{H} \quad (2.8)$$

де p – тиск між парами тертя;

f – коефіцієнт тертя в парі, що розглядається;

H – твердість матеріалу, що зношується;

k_4 – коефіцієнт пропорційності, $k_4 = 0.7$.

Перед цим необхідно визначити параметр масштабу ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k \mu_i^{-2} \right)^{-1/2} \quad (2.9)$$

де μ_i – медіана ресурсу з урахуванням i – го визначального параметра.

Потім, при сукупному врахуванні процесів втоми, розраховуємо коефіцієнт варіації ресурсу v :

$$v = \mu \left(\sum_{i=1}^k v_i^{2*} \mu_i^{-2} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Для розрахунку міцнісних характеристик та характеристик навантажувальності, за основу приймемо деякі технічні дані рубальних машин та механічні властивості сталей, з яких виготовляються деталі та складальні одиниці механізмів різання.

2.2. Визначення міцнісних показників елементів механізмів різання рубальних машин

Міцнісні показники матеріалів, з яких виготовлені деталі механізмів різання вибираються з довідникових даних відповідно до марки сталі. За основу розрахунку взято рубальну машину типу РМ-75 та РМ-110 виготовлену фірмою «Технопарк», м. Стрий. Деталі механізму для рубальної машини виготовлено з таких матеріалів:

- Барабан механізму різання – зварний, сталь s335;
- Сито механізму різання – листова сталь Hardox 450;
- Ножі механізму різання – листова сталь 1.123 Cirosteel;
- Контрніж механізму різання – наплавлення порошковим дротом, твердість 60 HRC

Згідно з [10], в таблиці 2.1 наведено механічні показники деяких з цих сталей.

Таблиця 2.1

Механічні властивості сталей

| Номінальна товщина, <i>мм</i> | Мінімальна межа плинності, <i>МПа</i> | Межа міцності (границя витривалості), <i>МПа</i> |
|-----------------------------------|--|---|
| сталь s335 | | |
| $> 40 \leq 63$ | 335 МПа | 470 - 630 МПа |
| Hardox 450 | | |
| 4.0 – 32.0 | 1400 МПа | 1700 МПа |
| Порошковий дріт, твердість 60 HRC | | |

| | | |
|----------------------------|---------|---------|
| 1.2 – 1.6 | 377 МПа | 559 МПа |
| Сталь ШХ-15 (підшипникова) | | |
| Твердість 62 – 65 HRC | 220 МПа | 600 МПа |

2.3. Визначення показників навантаженості елементів механізмів різання рубальних машин

Показники навантаженості визначаються для кожної деталі механізму окремо. Це спричинене тим, що кожна окрема деталь закріплена по-різному. Так барабан механізму різання утримується через роликові вальниці в корпусах, які закріплені до станини. Сито кріпиться болтами напрямую до станини. Ножі, в свою чергу, фіксуються через прокладки до барабана в спеціальних місцях.

Для зручності проведення подальших розрахунків складемо таблицю, в яку внесемо вихідні дані для кожної рубальної машини.

Таблиця 2.2

Вихідні дані для визначення характеристик навантаженості

| Технічні показники | Рубальні машини | |
|--|--|--|
| | PM-75 | PM-110 |
| Потужність основного двигуна, [N, кВт] | 75 кВт | 110 кВт |
| Передавальне відношення головної передачі, [i] | 1.5 | 1.5 |
| Параметри барабана діаметр/довжина, [мм] | 705/400 | 705/600 |
| Опори барабана тип/номер | Вальниця роликів, радіальна, сферична, двохранна – 3000/3615 | Вальниця роликів, радіальна, сферична, двохранна – 3000/3615 |

| | | |
|--|----------------|----------------|
| Ножі довжина/ширина/товщина, [мм], кількість, [шт] | 200/75/10 4 | 200/75/10 6 |
|--|----------------|----------------|

Для можливості проведення подальших розрахунків довговічності, розрахуємо середнє питоме колове зусилля та крутний момент, який виникає на барабані.

Рубальна машина РМ-75. Для визначення питомого колового зусилля P , скористаємося формулою [11]:

$$P = \frac{N_p \cdot 102}{V} \quad (2.11)$$

де N_p – потужність на різання, $N_p = N_\delta \times \xi = 75 \times 0.9 = 67.5$ кВт;

V – швидкість різання,

$$V = (\pi \times D \times n) / (60 \times 1000) = (3.14 \times 705 \times 2550) / (60 \times 1000) = 94.12 \text{ м/с};$$

Підставивши дані в формулу (2.10), отримаємо:

$$P = \frac{67.5 \cdot 102}{94.12} = 73,151 \text{ Н/мм} \quad (2.12)$$

Розрахуємо крутний момент на барабані для цієї ж машини:

$$M = \frac{97000 \times N}{n} \quad (2.13)$$

де N – потужність двигуна приводу, кВт;

n – частота обертання барабана, об/хв.

Звідси (2.12):

$$M = \frac{97000 \times 75}{2550} = 2852.941 \text{ Н/мм} \quad (2.14)$$

Рубальна машина РМ-110. Для визначення питомого колового зусилля P , скористаємося формулою (2.10):

$$P = \frac{99 \cdot 102}{94.12} = 107.288 \text{ Н/мм} \quad (2.15)$$

Оскільки діаметр барабана та частота його обертання такі як і в рубальній машині РМ-75, відповідно швидкість різання не зміниться. Розрахуємо крутний момент барабана (2.12):

$$M = \frac{97000 \times 110}{2550} = 4184.313 \text{ Н/мм} \quad (2.16)$$

2.4. Класифікація напружень робочого органу рубальної машини

Напруження, які виникають в тілі барабана рубальної машини можуть бути розділені на змінні (повторювані) і постійні [15]. Змінні напруження, виникають в тілі барабана під час експлуатування (від відцентрових сил інерції, сил різання і нерівномірного нагрівання), під час виготовлення (барабани розглянутих рубальних машин виготовлені зварними, після зварювання барабан проходить процес нормалізації або відпуску). Постійні напруження виникають, в основному, після завершення оброблення, під час встановлення на нього додаткових деталей, таких як ножі, з подальшою їхньою фіксацією, та вальниці.

Аналізуючи причини, що вони спричиняють виникнення напружень в тілі барабанів рубальних машин, напруження класифікуються на напруження від відцентрових сил інерції, від нерівномірного нагрівання барабана під час рубання сировини, від режимів відпуску сталі під час виготовлення, від сил різання. Особливо можуть бути виділені початкові напруження, які виникають в тілі барабана на різних етапах його виготовлення, причому виникнення початкових напружень відбувається при термічній обробці, його токарному обробленні і монтажі.

Далі розглянуті напруження барабанів які базуються на причинах їх виникнення. У всіх випадках (окрім сил які виникають при різанні) напружений

стан барабана приймається однаковим відносно осі. Тому задання приводиться до визначення розподілу радіальних напружень через його радіус.

Дія на тіло барабана сил інерції та нагріву.

Для вивчення характеру дії на тіло сил інерції, що діють від центра та нагрівання розглянемо приклад процесу виникнення напружень на прикладі диска [15]. Створювання розділимо на кілька етапів. На першому етапі розглянемо абсолютно жорстку систему в якій вантага масою G , яка закріплена на нитці (рис. 2.1) [15], і обертається паралельно осі O з круговою швидкістю V . Під час колового руху виникає відцентрова сила інерції I , яка працює в напрямі радіусу і намагається відірвати її від нитки. Нитка натягується. Із зростанням кількості оборотів та збільшенням радіусу відцентрове зусилля I виростає.

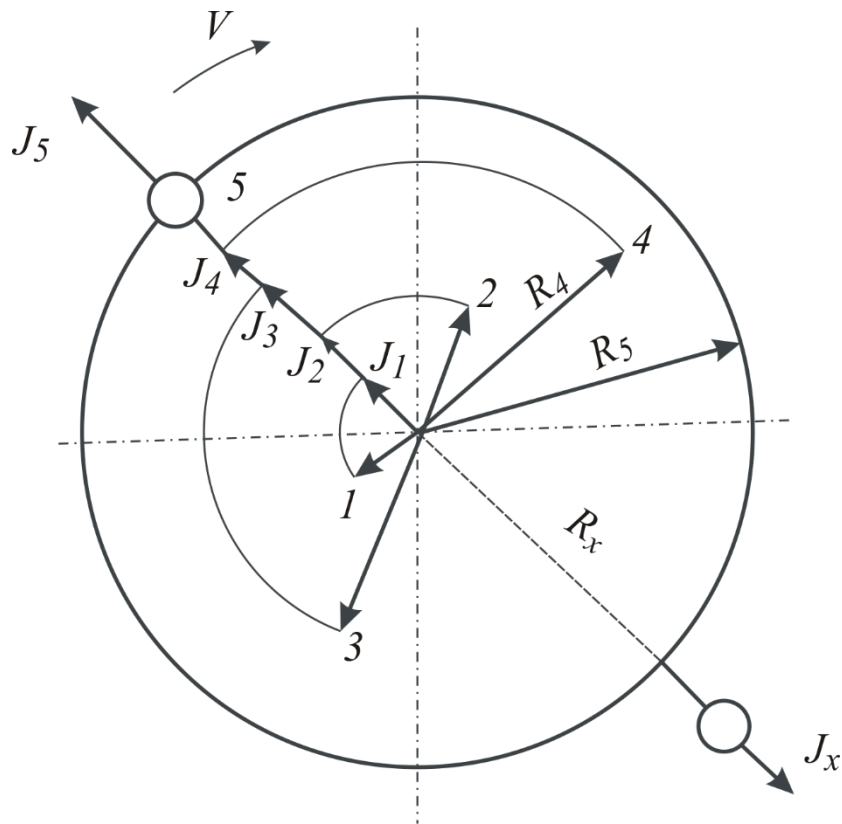


Рисунок 2.1 - Схема дії зусилля інерції, яке діє від центра при коловому русі вантажу [15]

Якщо радіус R розділити на кілька рівних частин і при постійному обертанні вантаж переміщувати з периферії S в ближче до центру I , то радіус обертання зміниться від R_5 до R_1 , як і величина сили, що діє від центру від J_5 до J_1 .

Наступним кроком створення прикладу замість нитки приймаємо гумовий канат. Під дією сили, що діє від центру, його радіус буде збільшуватись з R_5 до R_x . Нарешті наступить момент, коли величина сили, що діє від центру, буде урівноважена пружними деформаціями розтягування гумового каната. В даному випадку ці сили створюються виключно у напрямі радіусу.

На третьому прикладі візьмемо вузьку гумову оболонку типу кільця (рис. 2.2) [15] і надамо йому обертаний рух. Під дією сили, що діє від центра J_r , гумова оболонка буде розтягуватися у всіх напрямках однаково, оскільки вона ніяк не пов'язана з віссю обертання. В результаті загальна довжина оболонки збільшиться з L_0 до певного значення L_1 .

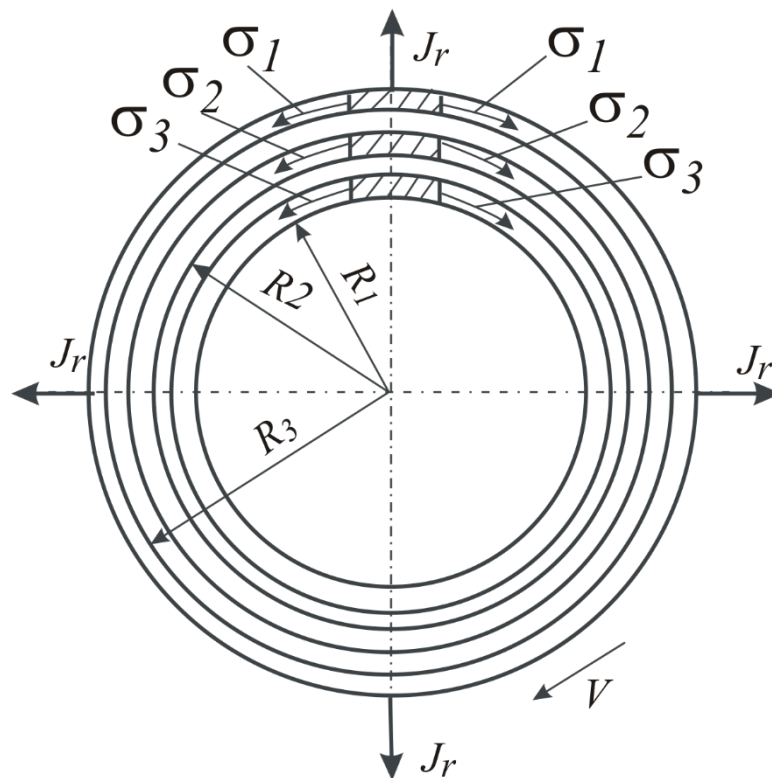


Рисунок 2.2 - Схема дії сил, що діють від центра при обертанні гумових оболонок [15]

Якщо замість гумової обертати сталеву оболонку, то всі описані процеси збережуться, але справжня їх величина, при тій же кількості обертання, буде значно меншою. Тепер на сталеву оболонку, що обертається, насувають дерев'яний брусок. При контакті з бруском зовнішня кромка нагріється, і в оболонці з'являться певні видовження, спричинені нагрівом. З рисунку 2.2 видно, що вузька оболонка не пов'язана з віссю обертання, тому під дією інерційних сил і зміни температури вона безперешкодно збільшується, наскільки допускають це пружні деформації, які виникають в металі за певних умов. Очевидно, збільшення оболонки зупиниться, коли сили, які провокують її збільшення при конкретній кількості оборотів і нагріву, будуть дорівнювати силам пружних деформацій металу. Натомість подовження, що виникли, викличуть напруги розтягу [15].

Четвертим кроком буде створення прикладу, де замість оболонки візьмемо диск, який рухається навколо осі (рис. 2.3) [15].

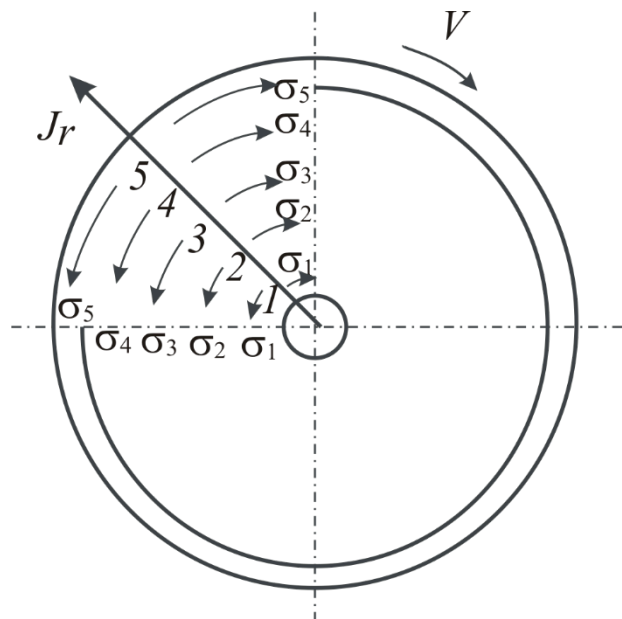


Рисунок 2.3 - Схема дії сил інерції при обертанні диску [15]

Тепер зовнішня оболонка зв'язана з віссю обертання. Саме тут сила I_r , що діє від центру на різних частинах довжини радіусу диска при певних обертах буде величина різною. На зовнішній крайці вона буде більша, а менша - біля осі обертання ($I_5 > I_4 > I_3 > I_2 > I_1$), тому зовнішня крайка диска при обертанні і нагріванні збільшиться, ніж крайки, які знаходяться в середній і центральній зонах. Через різну величину сили, що діє від центру, яка різниться за довжиною і нагріванням зовнішньої і внутрішніх крайок сталевого диска, нерівномірного подовження радіусів, обов'язково виникне різниця між подовженнями зовнішньої оболонки і значенням радіуса, що необхідне. В загальному маємо кінцеве подовження радіусів, яке не відповідає сумарному видовженню кола зовнішньої крайки - радіус не дає збільшитися зовнішній оболонці [15].

Зрештою на зовнішній крайці є ймовірність виникнення нульової або стискаючої дотичної напруги, що викличе втрату жорсткості у зовнішній зоні та зниження стійкості диска під час руху. На відміну від диска, барабан рубальної машини представляє собою пустотілий циліндр на периферії якого, по дотичній до периферії, розташовані ножі. Якщо нерівномірне нагрівання диска поширюється тільки по його радіусі, то нерівномірне нагрівання барабана поширюється ще й по його довжині. Завдяки своїй формі барабан стійкіший до дії сил, що діють нерівномірно зі сторони торця, проте якщо буде порушений баланс, чи співвісність торців, барабан втратить свою стійкість.

При рубанні деревини до дії сил, які діють від центру і в залежності від температури, добавляються зусилля різання. Оскільки їх величина невелика, то їх можна не враховувати [15].

Дослідимо, які з значень роблять на тривкість барабана найбільший вплив: величина сил, що діють від центру чи нагрів периферійної поверхні де розміщені ножі.

Під час руху циліндра по всьому його об'ємі виникають сили, що діють від центру, результатом яких є механічні напруги. На кожну частку об'єму циліндра, який обертається, діє сила від його центру:

$$P = \gamma * \omega * R * L, \quad (2.17)$$

де γ - густина металу, $\gamma = 7,5..7,9 \text{ т/м}^3$;

$\omega = n/30$ — колова швидкість, рад/с.;

R - радіус циліндра, мм;

L – довжина циліндра

На рис. 2.4 [15] схематично показаний барабан рубальної машини, на якому виділена елементарна ділянка А. Тут діє сила від центру інерції P , яка хоче відокремити частку А від тіла і цим викликає радіальні напруги σ_r .

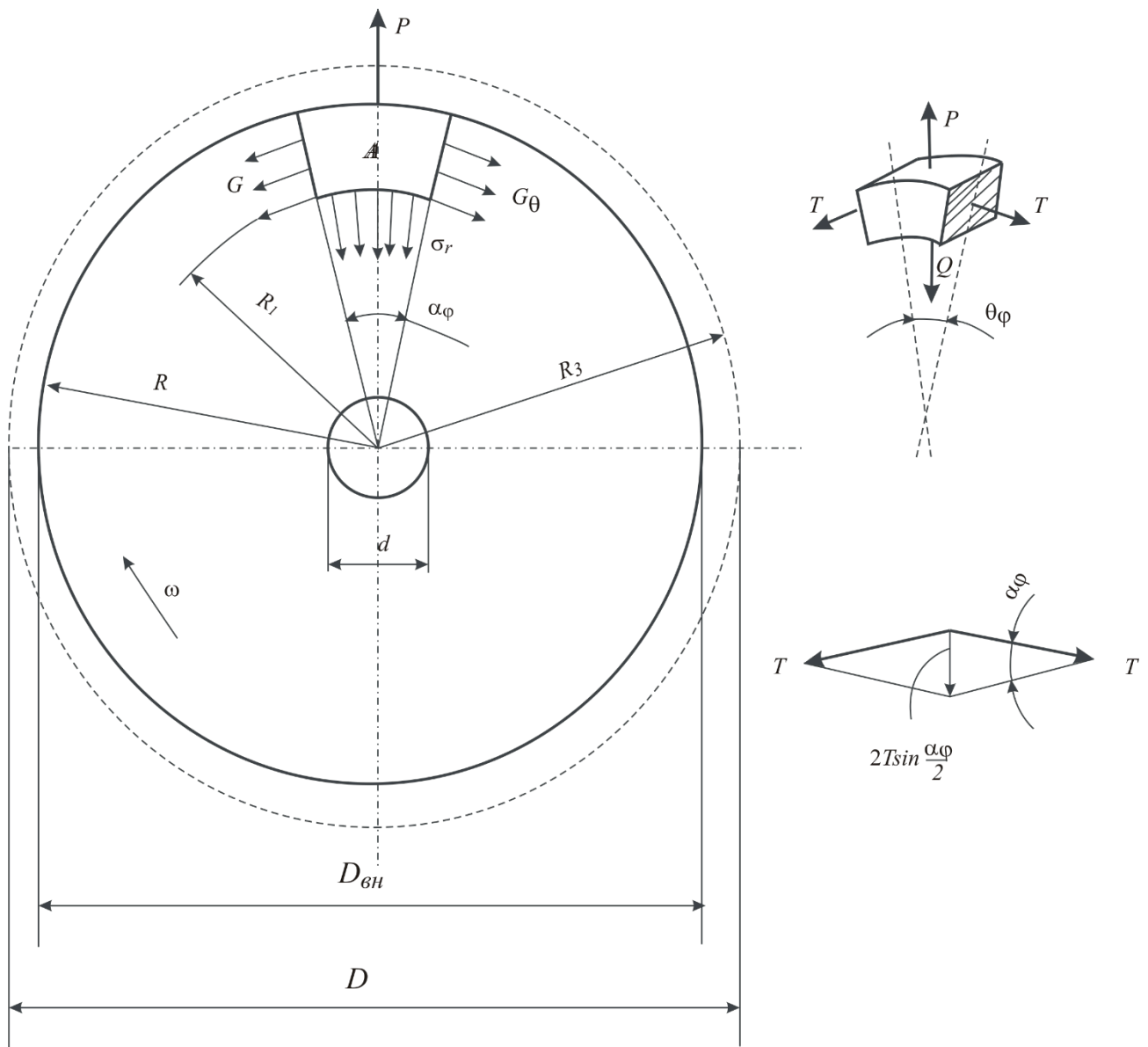


Рисунок 2.4 - Схема поділу внутрішніх напруг, що вони виникають в тілі барабана при його обертанні: ліворуч – схема барабана; праворуч - схеми напруг, що вони утворюються в окремій частці [15]

Крім того, якщо первинних напруг в барабані немає, то радіальні напруги, що утворюються при його русі, досліджуються наступною формулою (ножі не враховують) [15]:

$$\sigma_r = \frac{3+\mu\gamma}{8} \omega^2 \left(R^2 - \frac{R^2 r^2}{R_1^2} - R_1^2 \right) \quad (2.18)$$

σ_r - радіальні напруги, Па;

R_1 - радіус розташування ділянки А, мм;

$\mu = 0,29$ - коефіцієнт Пуансона;

ω - колова швидкість, рад/с.

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30} = \frac{2550 \cdot 3.14}{30} = 267.035 \text{ рад/с.} \quad (2.19)$$

Підставивши вказані значення в формулу (2.3) отримаємо:

$$\sigma_r = \frac{3 + 0.29 \cdot 7.75}{8} 267.035^2 \left(352.5^2 - \frac{352.5^2}{R_1^2} - R_1^2 \right) \quad (2.20)$$

За формулою 2.20, побудований теоретичний графік розподілу напружень в тілі барабана (рис.2.5).

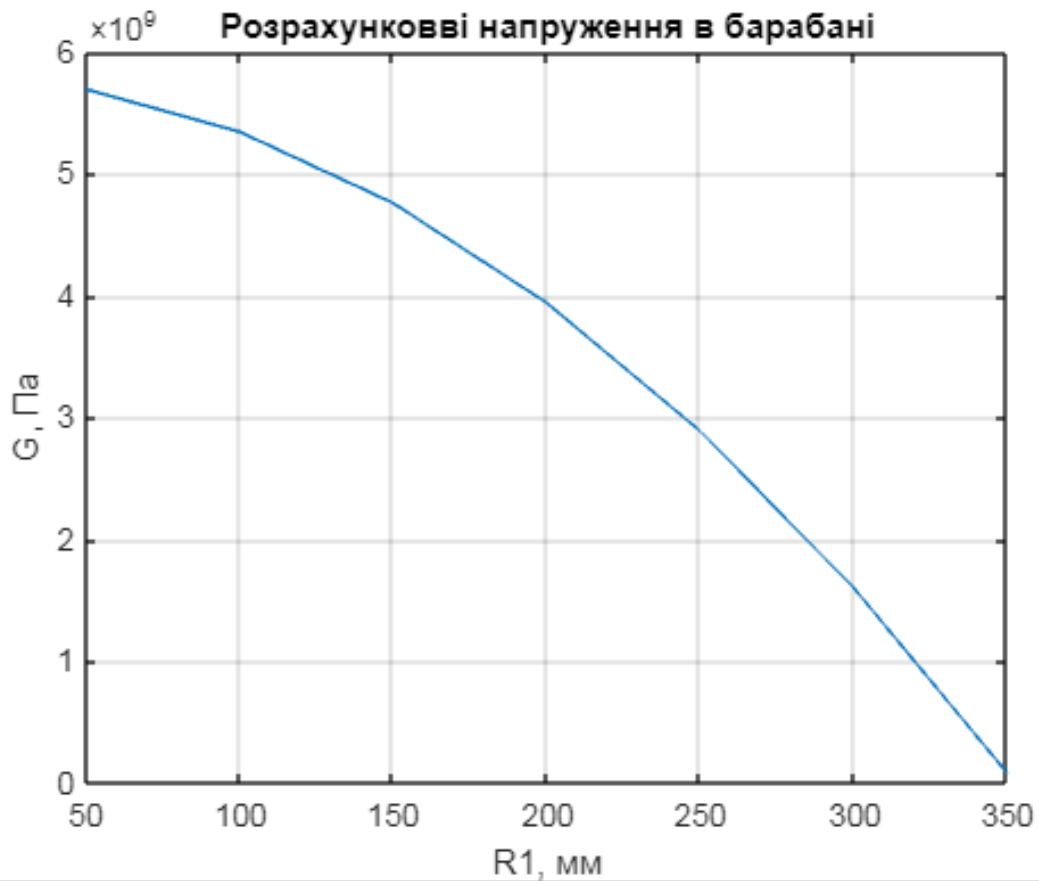


Рисунок 2.5 - Теоретичний графік розподілу напружень G в тілі барабана рубальної машини в залежності від радіуса розміщення елемента $R1$.

Аналізуючи графік на рис.2.5, який побудований за теоретичними даними, можна зробити висновок, що з наближенням до периферії барабана, напруження зменшуються. На радіусі $R = 350$ мм, напруження спричинені інерцією складають всього $G = 0.20...0.25 \times 10^9$ Па. Тобто міцність барабана при дії на нього сил інерції, можна вважати забезпеченою. Лістинг програмного коду в середовищі MATLAB, (див. в додаток В, рис. В1).

2.5. Висновки до розділу

1. Проведено короткий огляд обраної методики розрахунку показників надійності та розраховано питомі колові зусилля і крутні моменти на барабанах двох рубальних машин, які нами розглядаються – РМ-75 та РМ-110.

2. У зв'язку з відсутністю даних про міцнісні характеристики матеріалів деталей і умов їх навантаження, нами проведено попередні визначення цих необхідних даних, результати яких занесені в таблиці (2.1, 2.2).

3. Додатково побудований теоретичний графік розподілу напружень в тілі барабана, що вони виникають в процесі експлуатування.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

3.1. Визначення показників надійності складових механізму різання рубальної машини РМ-75

Враховуючи лінійну залежність між потужністю на різання N_p та питомим коловим зусиллям P (2.11 та 2.14), допускається [13] коефіцієнт варіації амплітуд напружень v_a приймати рівним коефіцієнту варіації статичного процесу руйнування v_o . Показники надійності всіх деталей визначаємо для значень коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування. Зокрема, у розрахунках прийнято такі точкові значення коефіцієнта варіації: 0.05; 0.075; 0.1; 0.125; 0.15. Дані розрахунку відповідно до конкретного значення коефіцієнта варіації, див. в табл. 3.1 – 3.8. В даному розділі розписано послідовність розрахунку показників надійності деталей при середньому значенні коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування $v=0.1$, з метою їх подальшого використання для визначення періодичності замін деталей рубальної машини.

Показники барабана РМ-75

Розрахунок середнього ресурсу

Середній ресурс – це математичне сподівання ресурсу [17]. Медіану розподілу ресурсу μ_1 для напруження кручення визначаємо через залежність:

$$\mu_1 = \frac{K_{\text{реж}} * N_o}{N_e} * \left(\frac{\sigma_{\text{ід}}}{\sigma_{\text{а max}}} \right) \quad (3.1),$$

де N_e – число навантажувальних одиниць за одиницю часу,

для рубальних машин $N_e = 10$;

N_o – абсциса точки зламу кривої втоми;

G_{id} – границя витривалості матеріалу, МПа;

$G_{a\ max}$ – максимальна амплітуда напружень, (формула 2.11).

Квантиль нормального розподілу – це значення розподілу ресурсу у вибірці в відсотках [17]. Дане значення розраховується шляхом знаходження дванадцяти випадкових чисел на проміжку від 0 до 1, далі від їхньої суми віднімається число 6. Квантиль нормального розподілу дорівнює:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = 6.49 - 6 = 0.49 \quad (3.2),$$

де y_i – псевдовипадкове число рівномірного розподілу на інтервалі (0...1);

$$a_p = 1 + 0.1^2 * 0.49^2 * 2 - 0.1^2 * 0.49 * \left(1 + \frac{0.1^2 * 0.49^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3.3)$$

Оскільки показники надійності, визначаються, в даному випадку, на основі границі втомної міцності матеріалу, визначати інтенсивність зношування немає потреби. Отже, розрахунок виконуємо, не беручи до уваги інтенсивність зношування вала.

$$a_T = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=0}^{m=1} \frac{(3-1)*0.1^2}{(3-1)*2} + \sum_{i=0}^{m=3} \frac{(3)*0.1^2}{(3)*2} \right\} = 0.015 \quad (3.4)$$

Визначимо режимний коефіцієнт $K_{реж}$ за формулою (2.4):

$$K_{реж} = \frac{1}{0.015} = 66.66 \quad (3.5)$$

Тепер підставимо дані у формулу (3.1):

$$\mu_1 = \frac{66.66*470}{10} * \left(\frac{550}{73.151}\right) = 23560 \text{ год.} \quad (3.6)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ (2.8):

$$\mu_1 = \left(\sum_{i=1}^k 23560^{-2} \right)^{-1/2} = 16660 \quad (3.7),$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу

Коефіцієнт варіації ресурсу – це статистичний показник, що характеризує співвідношення середньоквадратичного відхилення та середньої величини значення ресурсу [17]. При врахуванні процесу втоми, розраховуємо коефіцієнт варіації ресурсу v згідно з формулою (2.10):

$$v_1 = 23560 * (0.1^2 * 16660^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.8)$$

Проводимо розрахунок *середнього ресурсу* для барабана рубальної машини РМ-75 за формулою (2.1):

$$T_{cp1} = 23560 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2} \right) = 23790 \text{ год.} \quad (3.9),$$

Приймаємо середній ресурс $T_{cp1} = 23790$ повних годин роботи згідно з формулою (3.9).

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

Середнє квадратичне відхилення ресурсу – говорить нам як в середньому міняються розраховані значення ресурсу від його середнього значення [17]. Для визначення цього показника необхідно знайти добуток значень середнього ресурсу T_{cp} та коефіцієнту варіації ресурсу v та поділити на 100% [15]:

$$\sigma = \frac{v \times T_{cp1}}{100} = \frac{0.141 \times 23790}{100} = 33.64 \text{ год} \quad (3.10)$$

Розрахунок гамма-відсоткового ресурсу

Гамма – відсотковий ресурс – це сумарний наробіток, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках [17]. Розрахунок цього показника $[T_\gamma]$, проводимо за виразом (2.3), виходячи зі

значень квантилей для довірчих ймовірностей $\gamma=90\%$, $\gamma=95\%$, $\gamma=99\%$. Самі значення квантилей були визначені за допомогою програми Excel, (див. додатки):

$$T_{\gamma(90)} = 23790 - 1.281 * 33.647 = 23750 \text{ год} \quad (3.11)$$

$$T_{\gamma(95)} = 23790 - 1.644 * 33.647 = 23740 \text{ год} \quad (3.12)$$

$$T_{\gamma(99)} = 23790 - 2.326 * 33.647 = 23710 \text{ год} \quad (3.13)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток А, рис. А1-А3).

Таблиця 3.1

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів варіації деталі – барабан

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|---------------------------|------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 94470 | 42120 | 23790 | 15600 | 10620 |
| $T_{\gamma}, \text{ год}$ | $T_{\gamma(90)}$ | 94380 | 42060 | 23750 | 15570 | 10600 |
| | $T_{\gamma(95)}$ | 94360 | 42040 | 23740 | 15560 | 10590 |
| | $T_{\gamma(99)}$ | 94310 | 42010 | 23710 | 15540 | 10570 |
| $\sigma, \text{ год}$ | | 66.799 | 44.673 | 33.647 | 27.581 | 22.539 |
| ν | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники контролю РМ-75

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_i - 6 = 6.29 - 6 = 0.29 \quad (3.14)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * 0.29^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * 0.29^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3.15)$$

$$i = 0.7 * \frac{73.1 * 0.5}{60} = 0.426 \quad (3.16)$$

$$a_t = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-1-0.426) * 2} + \sum_{i=0}^3 \frac{(3+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-0.426) * 2} = 0.693 \quad (3.17)$$

$$K_{\text{реж}} = \frac{1}{0.693} = 1.441 \quad (3.18)$$

Тепер визначимо значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{1.441 * 470}{10} * \left(\frac{559}{73.151}\right) = 517.64 \quad (3.19)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 517.64_i^{-2}\right)^{-1/2} = 366.026 \quad (3.20)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 517.64 * \left(0.1^2 * 366.026^{-2}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.21)$$

Розрахунок середнього ресурсу для контрножа:

$$T_{\text{ср}} = 517.64 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2}\right) = 522.815 \text{ год.} \quad (3.22)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v * T_{\text{ср}}}{100} = \frac{0.141 * 522.815}{100} = 0.739 \text{ год} \quad (3.23)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 522.815 - 1.281 * 0.739 = 522.82 \text{ год} \quad (3.24)$$

$$T_{\gamma(95)} = 522.815 - 1.644 * 0.739 = 521.868 \text{ год} \quad (3.25)$$

$$T_{\gamma(99)} = 522.815 - 2.326 * 0.739 = 521.095 \text{ год} \quad (3.26)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток А, рис. А4-А6).

Таблиця 3.2

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів
варіації деталі – контрніж

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|---------------------------|------------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 937.36 | 720.42 | 522.82 | 434.98 | 374.85 |
| $T_{\gamma}, \text{ год}$ | $T_{\gamma}(90)$ | 936.519 | 719.448 | 521.868 | 433.995 | 373.838 |
| | $T_{\gamma}(95)$ | 936.279 | 719.171 | 521.65 | 433.716 | 373.55 |
| | $T_{\gamma}(99)$ | 935.827 | 718.65 | 521.095 | 433.192 | 373.007 |
| $\sigma, \text{ год}$ | | 0.663 | 0.764 | 0.739 | 0.769 | 0.795 |
| ν | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники сита РМ-75

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} \gamma_j - 6 = -6.72 - 6 = -0.72 \quad (3.27)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * (-0.72)^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * (-0.72)^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3.28)$$

$$i = 0.7 * \frac{73.151 * 0.5}{60} = 0.426 \quad (3.29)$$

$$a_t = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.426)*0.1^{2*0.426}}{0.426*(3-1-0.426)*2} + \sum_{i=0}^0 \frac{(3+0.426)*0.1^{2*0.426}}{0.426*(3-0.426)*2} = 0.706 \quad (3.30)$$

$$K_{\text{реж}} = \frac{1}{0.706} = 1.441 \quad (3.31)$$

Визначимо значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{11.441*600}{10} * \left(\frac{1700}{73.151}\right) = 2010 \text{ год} \quad (3.32)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 2010_i^{-2}\right)^{-1/2} = 1421 \quad (3.33)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 2010 * (0.6^2 * 1421^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.34)$$

Розрахунок середнього ресурсу для сита:

$$T_{\text{ср}} = 2010 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2}\right) = 2030 \text{ год.} \quad (3.35)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v * T_{\text{ср}}}{100} = \frac{0.141 * 2030}{100} = 2.871 \text{ год} \quad (3.36)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 2030 - 1.281 * 2.871 = 2026 \text{ год} \quad (3.37)$$

$$T_{\gamma(95)} = 2030 - 1.644 * 2.871 = 2025 \text{ год} \quad (3.38)$$

$$T_{y(99)} = 2030 - 2.326 * 2.871 = 2023 \text{ год} \quad (3.39)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток А, рис. А7-А9).

Таблиця 3.3

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів варіації деталі – сито

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|-----------------------|-----------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 3637 | 2584 | 2030 | 1688 | 1671 |
| $T_y, \text{ год}$ | $T_y(90)$ | 3634 | 2581 | 2026 | 1684 | 1666 |
| | $T_y(95)$ | 3633 | 2580 | 2025 | 1683 | 1665 |
| | $T_y(99)$ | 3631 | 2578 | 2023 | 1681 | 1663 |
| $\sigma, \text{ год}$ | | 2.572 | 2.741 | 2.871 | 2.984 | 3.545 |
| v | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники вальниці РМ-75

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = -6.29 - 6 = -0.29 \quad (3.40)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * (0.29)^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * (-0.29)^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3.41)$$

$$i = 0.7 * \frac{107.288 * 0.5}{60} = 0.88 \quad (3.42)$$

$$a_t = \frac{5329}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.88) * 0.1^{2*0.88}}{0.88 * (3-1-0.88) * 2} + \sum_{i=0}^0 \frac{(3+0.88) * 0.1^{2*0.88}}{0.88 * (3-0.88) * 2} = 0.062 \quad (3.43)$$

$$K_{\text{реж}} = \frac{1}{0.062} = 16.20 \quad (3.44)$$

Тепер визначимо графічно значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{16.20 \cdot 470}{10} * \left(\frac{600}{73.151} \right) = 6246 \text{ год} \quad (3.45)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 6246_i^{-2} \right)^{-1/2} = 4417 \quad (3.46)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 6246 * (0.1^2 * 4417^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.47)$$

Розрахунок середнього ресурсу для вальниці:

$$T_{\text{ср}} = 6246 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2} \right) = 6309 \text{ год.} \quad (3.48)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v \times T_{\text{ср}}}{100} = \frac{0.141 \times 6309}{100} = 8.922 \text{ год} \quad (3.49)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 6309 - 1.281 * 8.922 = 6309 \text{ год} \quad (3.50)$$

$$T_{\gamma(95)} = 6309 - 1.644 * 8.922 = 6294 \text{ год} \quad (3.51)$$

$$T_{\gamma(99)} = 6309 - 2.326 * 8.922 = 6288 \text{ год} \quad (3.52)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», див. додаток а, (рис. А10-А12)

Таблиця 3.4

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів варіації деталі – вальниця

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|----------------------|-----------|--|--------|-------|-------|-------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, год$ | | 21500 | 10500 | 6309 | 4286 | 3136 |
| $T_y, год$ | $T_y(90)$ | 21480 | 10490 | 6297 | 4276 | 3127 |
| | $T_y(95)$ | 21470 | 10490 | 6294 | 4274 | 3125 |
| | $T_y(99)$ | 21460 | 10480 | 6288 | 4269 | 3120 |
| $\sigma, год$ | | 15.199 | 11.142 | 8.922 | 7.577 | 6.652 |
| ν | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

3.2. Визначення показників надійності складових механізму різання рубальної машини РМ-110

Показники барабана РМ-110

Розрахунок середнього ресурсу

Квантиль нормального розподілу дорівнює:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = 6.87 - 6 = 0.87 \quad (3.53)$$

$$a_p = 1 + 0.1^2 * 0.87^2 * 2 - 0.1^2 * 0.87 * \left(1 + \frac{0.1^2 * 0.87^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1.006 \quad (3.54)$$

$$a_T = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=0}^{m=1} \frac{(3-1)*0.1^2}{(3-1)*2} + \sum_{i=0}^{m=3} \frac{(3)*0.1^2}{(3)*2} \right\} = 0.015 \quad (3.55)$$

Визначимо режимний коефіцієнт $K_{реж}$ за формулою (2.4):

$$K_{реж} = \frac{1.006}{0.015} = 67.09 \quad (3.56)$$

Тепер підставимо дані у формулу (3.1):

$$\mu_1 = \frac{67.09 \cdot 470}{10} * \left(\frac{550}{107.288} \right) = 16170 \text{ год.} \quad (3.57)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ (2.8):

$$\mu_1 = \left(\sum_{i=1}^k 16170^{-2} \right)^{-1/2} = 11430 \quad (3.58)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v_1 = 16170 * (0.1^2 * 11430^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.59)$$

Проводимо розрахунок *середнього ресурсу* для барабана рубальної машини РМ-110 за формулою (2.1):

$$T_{cp1} = 16170 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2} \right) = 16330 \text{ год.} \quad (3.60)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

Для визначення цього показника необхідно знайти добуток значень середнього ресурсу T_{cp} та коефіцієнту варіації ресурсу v та поділити на 100% [15]:

$$\sigma = \frac{v \times T_{cp1}}{100} = \frac{0.141 \times 16330}{100} = 23.091 \text{ год} \quad (3.61)$$

Приймаємо середній ресурс $T_{cpl} = 23790$ повних годин роботи згідно з формулою (3.9).

Розрахунок гамма-відсоткового ресурсу

$$T_{\gamma(90)} = 16330 - 1.281 * 23.091 = 16300 \text{ год} \quad (3.62)$$

$$T_{\gamma(95)} = 16330 - 1.644 * 23.091 = 16290 \text{ год} \quad (3.63)$$

$$T_{y(99)} = 16330 - 2.326 * 23.091 = 16270 \text{ год} \quad (3.64)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток Б, рис. Б1-Б3)

Таблиця 3.5

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів
варіації деталі – барабан

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|-----------------------|-----------|--|-------|--------|--------|--------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 64520 | 28820 | 16330 | 10750 | 7351 |
| $T_y, \text{ год}$ | $T_y(90)$ | 64640 | 28780 | 16300 | 10720 | 7331 |
| | $T_y(95)$ | 64440 | 28770 | 16290 | 10710 | 7325 |
| | $T_y(99)$ | 64410 | 28750 | 16270 | 10700 | 7314 |
| $\sigma, \text{ год}$ | | 45.619 | 30.57 | 23.091 | 18.997 | 15.593 |
| ν | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники контрожа РМ-110

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = 6.43 - 6 = 0.43 \quad (3.65)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * 0.43^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * 0.43^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.999 \quad (3.66)$$

$$i = 0.7 * \frac{73.1 * 0.5}{60} = 0.426 \quad (3.67)$$

$$a_t = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-1-0.426) * 2} + \sum_{i=0}^3 \frac{(3+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-0.426) * 2} = 0.693 \quad (3.68)$$

$$K_{\text{реж}} = \frac{0.999}{0.693} = 1.442 \quad (3.69)$$

Тепер визначимо значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{1.442 \cdot 470}{10} * \left(\frac{559}{107.288} \right) = 353.15 \quad (3.70)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 353.15_i^{-2} \right)^{-1/2} = 249.71 \quad (3.71)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 353.15 * (0.1^2 * 249.71^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.72)$$

Розрахунок середнього ресурсу для контрножа:

$$T_{\text{ср}} = 353.15 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2} \right) = 356.68 \text{ год.} \quad (3.73)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v \times T_{\text{ср}}}{100} = \frac{0.141 \times 356.68}{100} = 0.504 \text{ год} \quad (3.74)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 356.68 - 1.281 * 0.504 = 356.039 \text{ год} \quad (3.75)$$

$$T_{\gamma(95)} = 356.68 - 1.644 * 0.504 = 355.856 \text{ год} \quad (3.76)$$

$$T_{\gamma(99)} = 356.68 - 2.326 * 0.504 = 355.512 \text{ год} \quad (3.77)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток Б, рис. Б4-Б6)

Таблиця 3.6

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів
варіації деталі – контрніж

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|----------------------|-------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, год$ | | 639.214 | 453.365 | 356.68 | 296.509 | 255.416 |
| $T_{y}, год$ | $T_{y(90)}$ | 638.635 | 452.749 | 356.039 | 295.838 | 254.722 |
| | $T_{y(95)}$ | 638.471 | 452.574 | 355.856 | 295.647 | 254.525 |
| | $T_{y(99)}$ | 638.163 | 452.246 | 355.512 | 295.29 | 254.156 |
| $\sigma, год$ | | 0.452 | 0.452 | 0.504 | 0.524 | 0.542 |
| ν | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники сита РМ-110

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = -6.57 - 6 = -0.57 \quad (3.71)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * (-0.57)^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * (-0.57)^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1.012 \quad (3.72)$$

$$i = 0.7 * \frac{25 * 0.5}{60} = 0.145 \quad (3.73)$$

$$a_t = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-1-0.426) * 2} + \sum_{i=0}^0 \frac{(3+0.426) * 0.1^{2*0.426}}{0.426 * (3-0.426) * 2} = 0.702 \quad (3.74)$$

$$K_{реж} = \frac{1.012}{0.702} = 1.442 \quad (3.75)$$

Визначимо значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{1.442 \cdot 600}{10} * \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 1371 \text{ год} \quad (3.76)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 1371_i^{-2} \right)^{-1/2} = 969.312 \quad (3.77)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 1371 * (0.6^2 * 969.312^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.78)$$

Розрахунок середнього ресурсу для сита:

$$T_{cp} = 1371 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2} \right) = 1385 \text{ год.} \quad (3.79)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v \cdot T_{cp}}{100} = \frac{0.141 \cdot 1385}{100} = 1.958 \text{ год} \quad (3.80)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 1385 - 1.281 * 1.958 = 1382 \text{ год} \quad (3.81)$$

$$T_{\gamma(95)} = 1385 - 1.644 * 1.958 = 1381 \text{ год} \quad (3.82)$$

$$T_{\gamma(99)} = 1385 - 2.326 * 1.958 = 1380 \text{ год} \quad (3.83)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток Б, рис. Б7-Б9).

Таблиця 3.7

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів варіації деталі – сито

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|---------------------------|------------------|--|-------|------|-------|---------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 2483 | 1760 | 1385 | 1151 | 991.85 |
| $T_{\gamma}, \text{ год}$ | $T_{\gamma(90)}$ | 2481 | 1757 | 1382 | 1148 | 989.156 |
| | $T_{\gamma(95)}$ | 2480 | 1757 | 1381 | 1148 | 988.392 |

| | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| | $T_v(99)$ | 2479 | 1755 | 1380 | 1146 | 986.957 |
| | $\sigma, \text{год}$ | 1.756 | 1.867 | 1.958 | 2.034 | 2.104 |
| | ν | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

Показники вальниці РМ-110

Визначимо квантиль нормального розподілу:

$$U_p = \sum_{j=1}^{12} y_j - 6 = 7.38 - 6 = 1.38 \quad (3.84)$$

Режимний коефіцієнт дорівнює:

$$a_p = 1 + 0.1^2 * (1.38)^2 * 2 - 0.1^2 ** \left(1 + \frac{0.1^2 * (1.38)^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1.024 \quad (3.85)$$

$$i = 0.7 * \frac{107.288 * 0.5}{60} = 0.88 \quad (3.86)$$

$$a_t = \frac{1.024}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{(3-1+0.88) * 0.1^{2*0.88}}{0.88 * (3-1-0.88) * 2} + \sum_{i=0}^0 \frac{(3+0.88) * 0.1^{2*0.88}}{0.88 * (3-0.88) * 2} = 0.063 \quad (3.87)$$

$$K_{\text{реж}} = \frac{1.024}{0.063} = 16.25 \quad (3.88)$$

Тепер визначимо графічно значення медіани розподілу ресурсу, підставивши відомі величини:

$$\mu_1 = \frac{16.20 * 470}{10} * \left(\frac{600}{107.288}\right) = 4273 \text{ год} \quad (3.89)$$

Визначаємо масштаб ресурсу μ :

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^k 4273_i^{-2}\right)^{-1/2} = 3022 \quad (3.90)$$

Розрахунок коефіцієнту варіації ресурсу:

$$v = 4273 * (0.1^2 * 3022^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \quad (3.91)$$

Розрахунок середнього ресурсу для вальниці:

$$T_{cp} = 4273 * \left(1 + \frac{0.141^2}{2}\right) = 4316 \text{ год.} \quad (3.92)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{v \times T_{cp}}{100} = \frac{0.141 \times 4316}{100} = 6.104 \text{ год} \quad (3.93)$$

Визначення гамма – відсоткового ресурсу:

$$T_{\gamma(90)} = 4316 - 1.281 * 6.104 = 4308 \text{ год} \quad (3.94)$$

$$T_{\gamma(95)} = 4316 - 1.644 * 6.104 = 4306 \text{ год} \quad (3.95)$$

$$T_{\gamma(99)} = 4316 - 2.326 * 6.104 = 4302 \text{ год} \quad (3.96)$$

Розрахунок всіх вище зазначених показників, проводився в середовищі «Mathcad14», (див. додаток Б, рис. Б10-Б12)

Таблиця 3.8

Результати показників надійності щодо прийнятих значень коефіцієнтів
варіації деталі – вальниця

| Показники надійності | | Значення коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування | | | | |
|---------------------------|------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| $T_{cp}, \text{ год}$ | | 14730 | 7051 | 4316 | 2916 | 2147 |
| $T_{\gamma}, \text{ год}$ | $T_{\gamma(90)}$ | 14710 | 7041 | 4308 | 2910 | 2141 |
| | $T_{\gamma(95)}$ | 14710 | 7039 | 4306 | 2908 | 2139 |
| | $T_{\gamma(99)}$ | 14700 | 7033 | 4302 | 2904 | 2136 |
| $\sigma, \text{ год}$ | | 10.414 | 7.479 | 6.104 | 5.156 | 4.554 |
| v | | 0.071 | 0.106 | 0.141 | 0.177 | 0.212 |

3.3. Формування потоку заміन деталей рубальних машин

Запропоновані методи розрахунку надійності [5], дозволяють прогнозувати об'єми виготовлення та норми затрат запчастин для машин. Основою такого прогнозування є розраховані вище значення середнього ресурсу та довідникові коефіцієнти використання, які далі складаються в єдиний для всіх деталей календарний час роботи до їхньої першої заміни. В подальшому вираховується кількість таких замін за ремонтний цикл та за кожен рік експлуатування. Це дасть можливість визначити очікувану потребу заміни деталей, в залежності від терміну служби машин.

Визначаємо кількість ремонтних циклів за весь термін експлуатування машини до її списання згідно формули [5]:

$$\Omega' = \frac{8760 * T_a * K_v}{T_{рсп1к}} \leq \Omega \quad (3.97)$$

де T_a – середній термін експлуатування машини до списання, роки. Для рубальних машин барабанного типу $T_a = 6$ років;

K_v – коефіцієнт використання машини на протязі року. $K_v = 0.83$;

$T_{рсп1к}$ – середній ресурс до першого капремонту. При експлуатуванні машин барабанного типу, встановлено [15], що середній ресурс до першого капремонту дорівнює середньому ресурсу i -тої деталі, де він (ресурс) найбільший. В нашому випадку це деталь – барабан, середній ресурс якого для РМ-75 становить $T_{рсп1к} = 23790$ год, а для РМ-110, $T_{рсп1к} = 16330$ год. Під час виконання ремонту (технічного обслуговування), виконується заміна або відновлення зношених деталей та елементів.

Підставивши дані у формулу (3.97), отримаємо наступне:

$$\Omega'_{75} = \frac{8760 * 6 * 0.83}{23790} = 1.83 \quad (3.98)$$

$$\Omega'_{110} = \frac{8760*6*0.83}{16330} = 2.67 \quad (3.99)$$

Приймаємо $\Omega_{75} = 2$.

Приймаємо $\Omega_{110} = 3$

3.3.1. Визначення періодичності заміни (ремонт) барабанів рубальних машин

Визначимо число замін барабанів за формулою [5]:

$$F'_j = \frac{T_{\text{рсп1к}} * K_j * K_i * \Omega'}{T_{\text{рспj}}} \leq F_j \quad (3.100)$$

де K_j, K_i – коефіцієнти використання j -ї деталі та i -того вузла,

$T_{\text{рспj}}$ – середній ресурс j -ї деталі.

З формули (3.100), отримуємо результат:

$$F'_{j75} = \frac{23790*2.0*0.4*1.83}{23790} = 1.46 \quad (3.101)$$

$$F'_{j110} = \frac{16330*2.0*0.4*2.67}{16330} = 2.13 \quad (3.102)$$

Приймаємо $F_{j75} = 2$ рази.

Приймаємо $F_{j110} = 3$ рази.

Далі розрахуємо термін служби кожного з валів до їх першої заміни (ремонт):

$$t_j^{(1)} = \frac{T_{\text{рсп}j}}{8760 * K_B * K_i * K_j} \quad (3.103)$$

В результаті отримаємо:

$$t_j^{(1)} 75 = \frac{23790}{8760 * 0.83 * 2.0 * 0.4} = 4 \text{ роки} \quad (3.104)$$

$$t_j^{(1)} 110 = \frac{16330}{8760 * 0.83 * 2.0 * 0.4} = 3 \text{ роки} \quad (3.105)$$

Останнім кроком знайдемо середню кількість замін (ремонтів) валів в кожному ремонтному циклі:

$$Y_j = \frac{F'_j + 1}{\Omega'} \quad (3.106)$$

З виразу (3.106), отримуємо:

$$Y_j 75 = \frac{1.46 + 1}{1.83} = 1.34 \quad (3.107)$$

$$Y_j 110 = \frac{2.13 + 1}{2.67} = 1.17 \quad (3.108)$$

Результати розрахунку зведені в таблиці (4.1).

3.3.2. Визначення періодичності заміни контрножів рубальних машин

Аналогічним чином, підставляючи відповідні дані, знаходимо періодичність заміни наступної деталі – контрножа.

Визначимо число замін контрножів за формулою (3.100):

$$F'_j 75 = \frac{23790 * 2.0 * 0.2 * 1.83}{522} = 33.36 \quad (3.109)$$

$$F'_j 110 = \frac{16330 * 2.0 * 0.2 * 2.67}{356.68} = 48.89 \quad (3.110)$$

Приймаємо число замін $F_j 75 = 34 \text{ рази}$.

Приймаємо число замін $F_j 110 = 49 \text{ разів}$.

Далі розрахуємо термін служби контрножів до їх першої заміни (перегострення), в результаті отримаємо:

$$t_j^{(1)} 75 = \frac{522}{8760 \cdot 0.83 \cdot 2.0 \cdot 0.2} = 0.18 \text{ роки} \quad (3.111)$$

$$t_j^{(1)} 110 = \frac{356.68}{8760 \cdot 0.83 \cdot 2.0 \cdot 0.2} = 0.12 \text{ роки} \quad (3.112)$$

Останнім кроком знайдемо середню кількість замін (перегострень) контрножів в кожному ремонтному циклі, з виразу (3.106), отримуємо:

$$Y_j 75 = \frac{33.36+1}{1.83} = 18.77 \quad (3.113)$$

$$Y_j 110 = \frac{48.89+1}{2.68} = 18.61 \quad (3.114)$$

Результати розрахунку зведені в таблиці (4.1).

3.3.3. Визначення періодичності заміни сит рубальних машин

Аналогічним чином, підставляючи відповідні дані, знаходимо періодичність заміни наступної деталі – сита.

Визначимо число замін сит за формулою (3.100):

$$F'_j 75 = \frac{23790 \cdot 2.0 \cdot 0.2 \cdot 1.83}{2030} = 8.57 \quad (3.115)$$

$$F'_j 110 = \frac{16330 \cdot 2.0 \cdot 0.2 \cdot 2.68}{1385} = 12.59 \quad (3.116)$$

Приймаємо число замін $F_j 75 = 9$ разів.

Приймаємо число замін $F_j 110 = 13$ разів.

Далі розрахуємо термін служби сит до їх першої заміни (ремонт), в результаті отримаємо:

$$t_j^{(1)} 75 = \frac{2030}{8760 \cdot 0.83 \cdot 2.0 \cdot 0.2} = 0.69 \text{ роки} \quad (3.117)$$

$$t_j^{(1)} 110 = \frac{1385}{8760 \cdot 0.83 \cdot 2.0 \cdot 0.2} = 0.47 \text{ роки} \quad (3.118)$$

Останнім кроком знайдемо середню кількість замін (ремонтів) сита в кожному ремонтному циклі, з виразу (3.106), отримуємо:

$$Y_j 75 = \frac{8.57+1}{1.83} = 5.22 \quad (3.119)$$

$$Y_j 110 = \frac{12.59+1}{2.68} = 5.07 \quad (3.120)$$

Результати розрахунку зведені в таблиці (4.1).

3.3.4. Визначення періодичності заміни вальниць барабанів рубальних машин

Аналогічним чином, підставляючи відповідні дані, знаходимо періодичність заміни наступної деталі – вальниці.

Визначимо число замін вальниці за формулою (3.100):

$$F'_j 75 = \frac{23790*2.0*0.4*1.83}{6309} = 5.52 \quad (3.121)$$

$$F'_j 110 = \frac{16330*2.0*0.4*2.68}{4316} = 8.11 \quad (3.122)$$

Приймаємо число замін $F_j 75 = 6$ раз.

Приймаємо число замін $F_j 110 = 9$ раз.

Далі розрахуємо термін служби вальниць до їх першої заміни, в результаті отримаємо:

$$t_j^{(1)} 75 = \frac{6309}{8760*0.83*2.0*0.4} = 1.08 \text{ роки} \quad (3.123)$$

$$t_j^{(1)} 110 = \frac{4316}{8760*0.83*2.0*0.4} = 0.74 \text{ роки} \quad (3.124)$$

Останнім кроком знайдемо середню кількість замін вальниць в кожному ремонтному циклі, з виразу (3.106), отримуємо:

$$Y_j 75 = \frac{5.52+1}{1.83} = 3.56 \quad (3.125)$$

$$Y_j 110 = \frac{8.11+1}{2.68} = 3.39 \quad (3.126)$$

Результати розрахунку зведені в таблиці (4.1).

3.4. Висновки до розділу

1. Проведено розрахунок показників надійності наступних деталей та елементів механізмів різання рубальних машин: барабани, контрножі, сита та вальниці.

2. З метою забезпечення можливості подальшого аналізу залежностей показників надійності від можливих видів та стану сировини, що вона буде подрібнюватися, розрахунок цих показників для всіх деталей проводився при наступних межах коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування: $v_o = 0.05; 0.075; 0.1; 0.125; 0.15$.

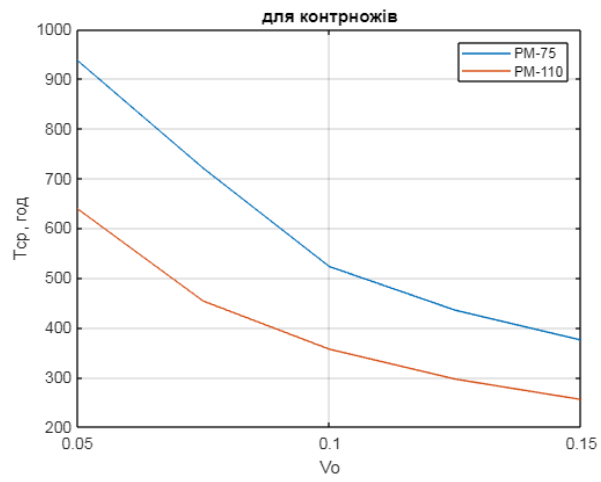
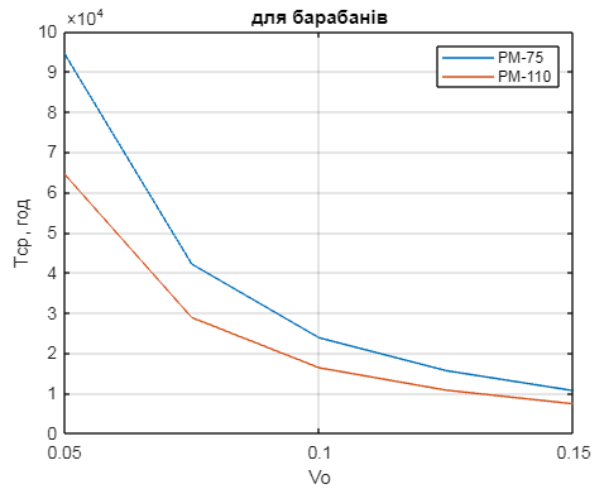
3. Для кожного значення коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування було розраховано гамма-відсотковий ресурс при трьох довірчих ймовірностях: $\gamma=90\%$, $\gamma=95\%$, $\gamma=99\%$.

4. На основі визначених середніх ресурсів кожної з деталей, проведено розрахунок періодичності їх замін чи ремонтів.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

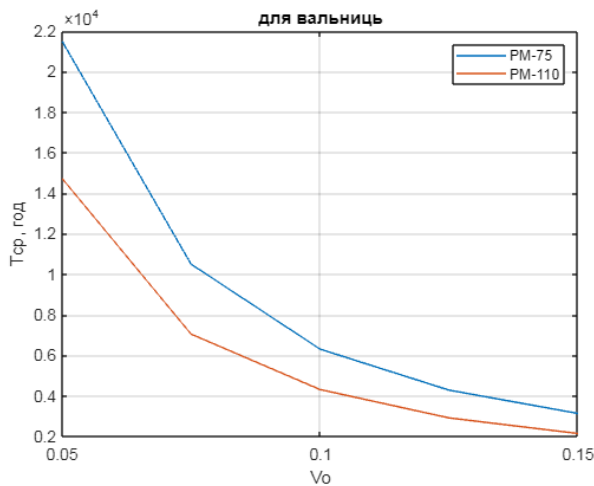
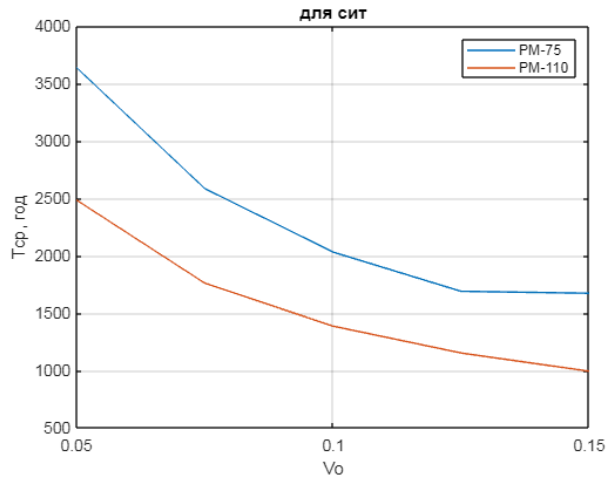
4.1. Зведені результати розрахованих показників надійності

Для аналізу вище проведених розрахунків будемо суміщені графіки залежності середнього ресурсу деталі T_{cp} від точкових значень коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування v_o , для обидвох однакових деталей рубальних машин РМ-75 та РМ-110. На рис. 4.1, можна побачити чотири окремі суміщені графіки, кожен з яких побудований для свого типу деталей:



a)

б)



в)

г)

Рисунок 4.1 – Зведені графіки залежностей середнього ресурсу $T_{ср}$ деталей від коефіцієнтів варіації їх статичного руйнування V_0

- а) – суміщений графік для барабанів; б) - суміщений графік для контрножів;
 в) - суміщений графік для сит; г) - суміщений графік для вальниць.

Аналізуючи графіки на рисунку 4.1, в цілому, одразу можна зауважити менший ресурс деталей потужнішої машини РМ-110 в порівнянні з менш потужнішою РМ-75. В першу чергу це зумовлено тим, що питоме колоне зусилля, яке виникає на барабані більш потужнішої машини – більше. Впливають також міцнісні характеристики матеріалу деталей. Як відомо, ідентичні деталі двох рубальних машин, виготовлені з однакового матеріалу, проте навантаження на окремо взятую деталь відрізняється, а отже відрізняється і ресурс роботи. Вивчаючи вплив на ресурс деталей коефіцієнтів варіації

статичного процесу руйнування (рис. 4.1, *а, б, в, г*) видно, що залежність не прямолінійна. Зі збільшенням коефіцієнта варіації, ресурс деталі зменшується. Причиною є перевищення допустимого навантаження фактичним. Відомо, що статичне руйнування – це процес руйнування деталі під дією перевантаження. Пояснити це можна двома чинниками:

На прикладі твердості сировини, яка переробляється на рубальних машинах. Чим більша твердість сировини, тим більше навантаження на елементи механізму різання. Оскільки твердість сировини може змінюватися на протязі циклу роботи машини (наприклад, почергове подрібнення сирої сосни та відходів ДСП, або мерзлої деревини), відповідно змінюється і фактичне навантаження, що діє на складові механізму різання.

Крім того, на ріст коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування, а від так і на зменшення ресурсу, може впливати також і процес різання з перервами, що супроводжується, в основному, ударами в момент врізання ножа в деревину. Згідно [2], перервний процес різання виникає у машинах з кількістю ножів до 4 шт. В нашому випадку – це рубальна машина РМ-75, з кількістю ножів – 4 шт. Так, розглядаючи барабан машини РМ-75, при коефіцієнті варіації статичного процесу руйнування $v_o = 0.05$, середній ресурс барабана складає $T_{cp} = 94470$ годин, проте при коефіцієнті $v_o = 0.15$, середній ресурс тієї самої деталі вже становить $T_{cp} = 10620$ годин. Щодо безперервного різання [2], воно не викликає ударів під час рубання, але відбувається в машинах з кількістю ножів 6 -16 шт. В нас це машина РМ-110, з кількістю ножів 6 шт. З рис 4,1, *а*, бачимо наступне: при коефіцієнті варіації статичного процесу руйнування $v_o = 0.05$, середній ресурс барабана РМ-110, складає $T_{cp} = 64520$ годин, проте при коефіцієнті $v_o = 0.15$, середній ресурс тієї самої деталі вже становить $T_{cp} = 7351$ година. Бачимо, що навіть за умови спокійнішого процесу різання, середній ресурс деталей потужнішої машини - менший.

Звідси виходить, що на ресурс деталей, питома навантаження, яке діє на них, чинить більший вплив, ніж процеси різання (перервне чи безперервне).

Статичне руйнування значно впливає на термін служби деталей, при цьому залежність між ними не прямолінійна.

Розглянемо залежність гамма-відсоткового ресурсу T_γ кожної з деталей від ймовірності безвідмовної роботи γ . Для зручності аналізування, побудуємо діаграми для кожної з деталей (рис.4.2 – 4.9).

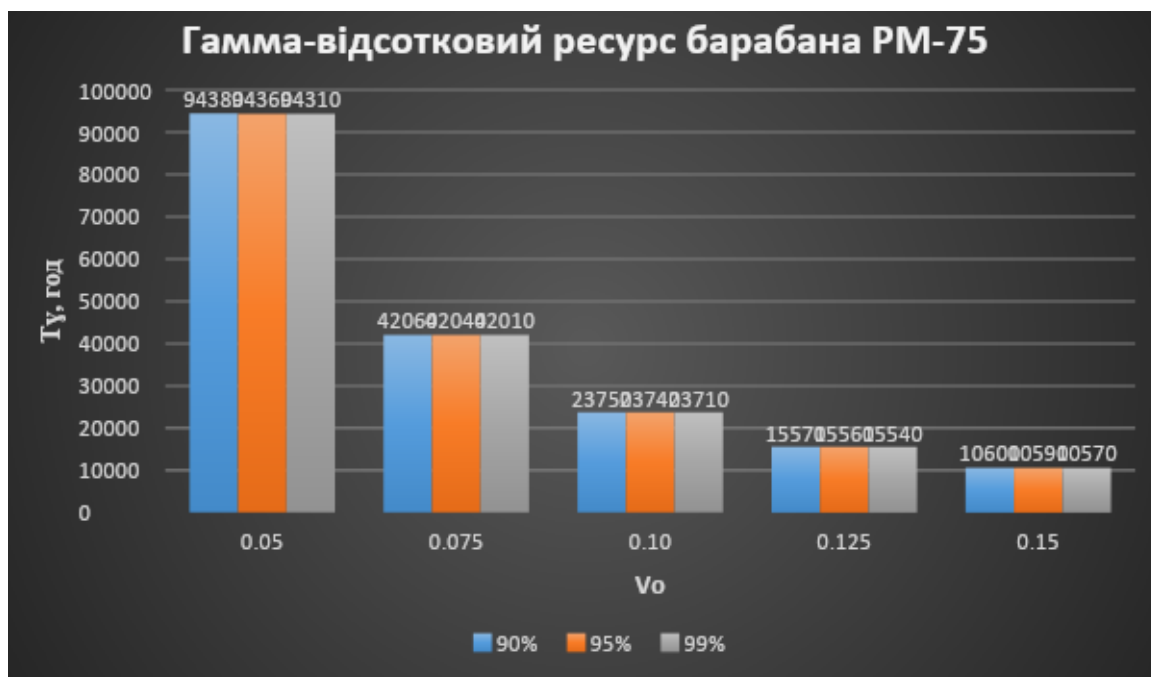


Рисунок 4.2 – Залежність між чинниками для барабана машини РМ-75



Рисунок 4.3 – Залежність між чинниками для контрножа машини РМ-75

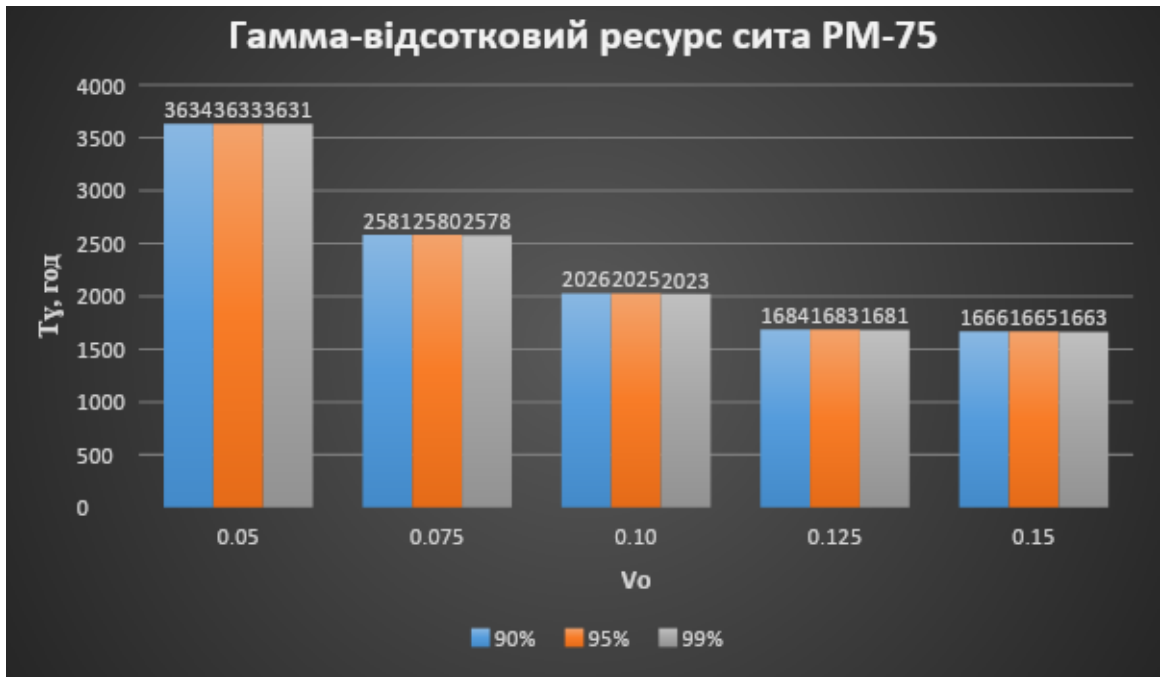


Рисунок 4.4 – Залежність між чинниками для сита машини РМ-75

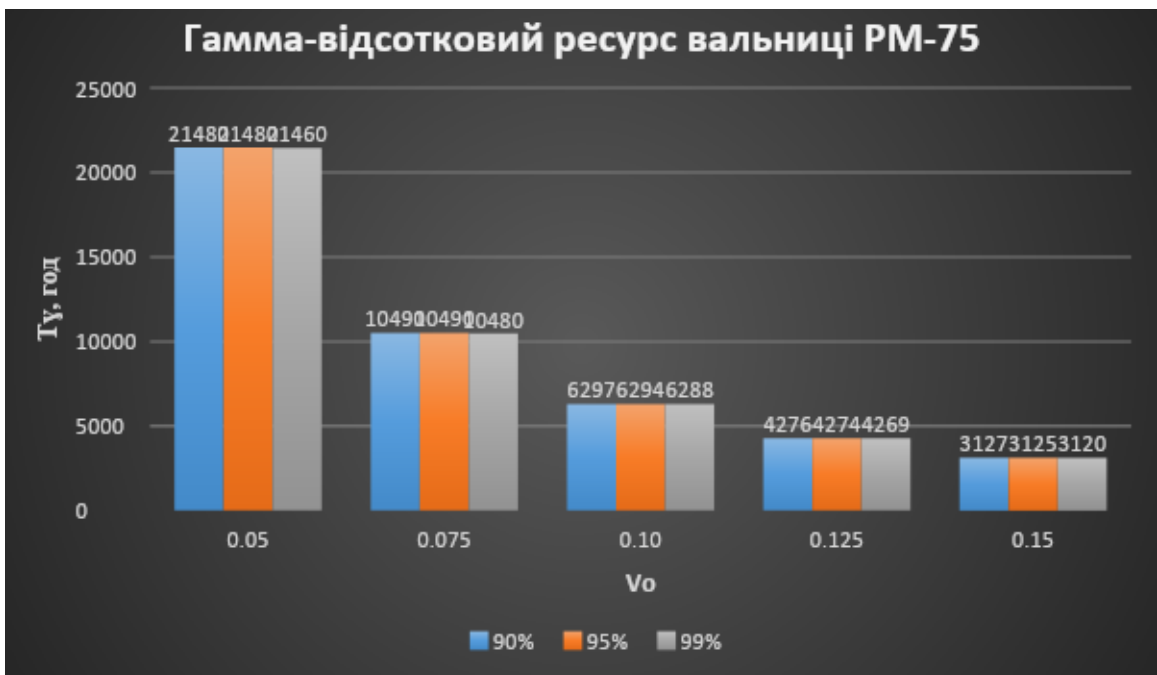


Рисунок 4.5 – Залежність між чинниками для вальниці машини РМ-75

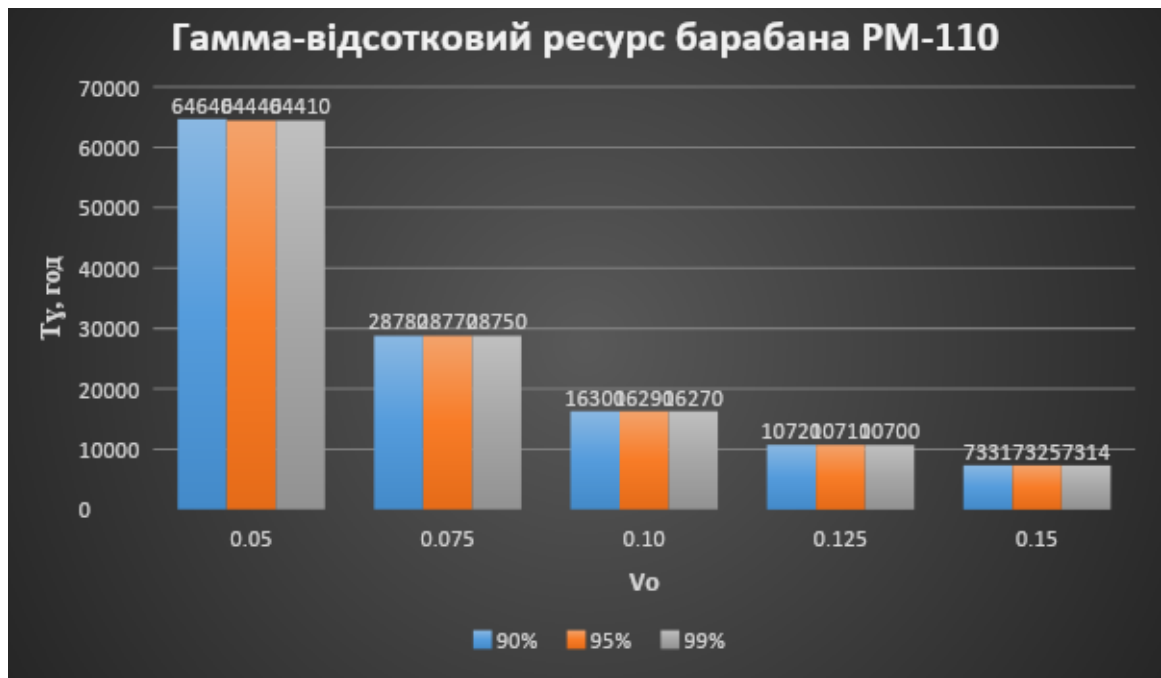


Рисунок 4.6 – Залежність між чинниками для барабана машини РМ-110

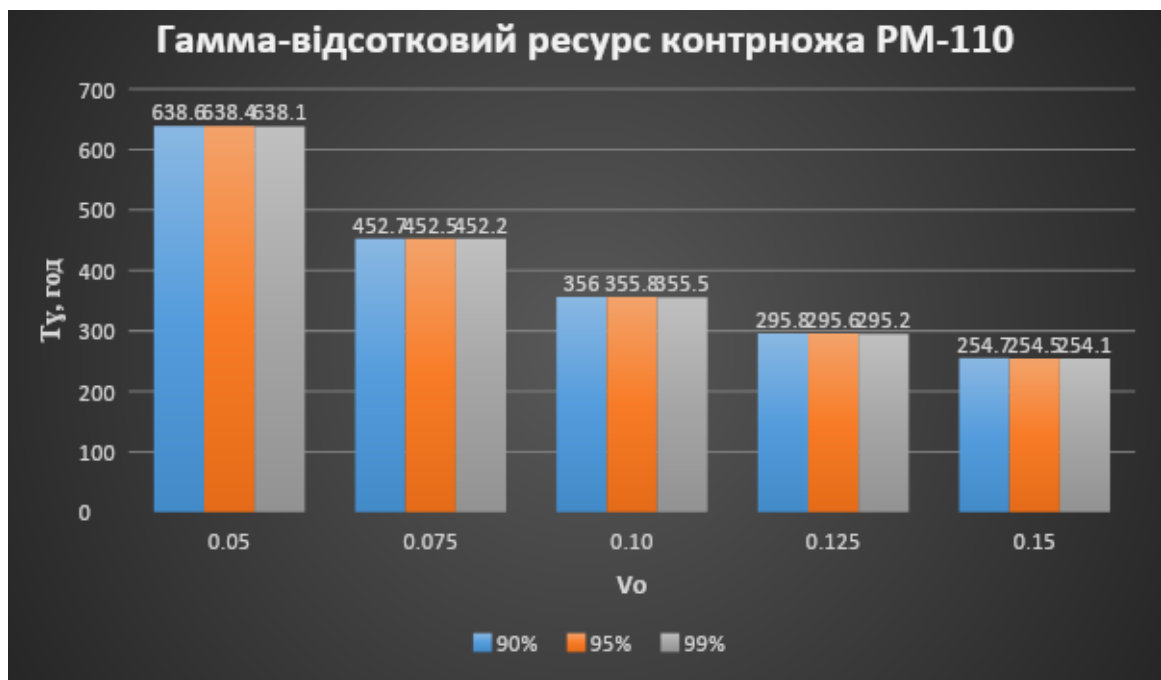


Рисунок 4.7 – Залежність між чинниками для контрножа машини РМ-110

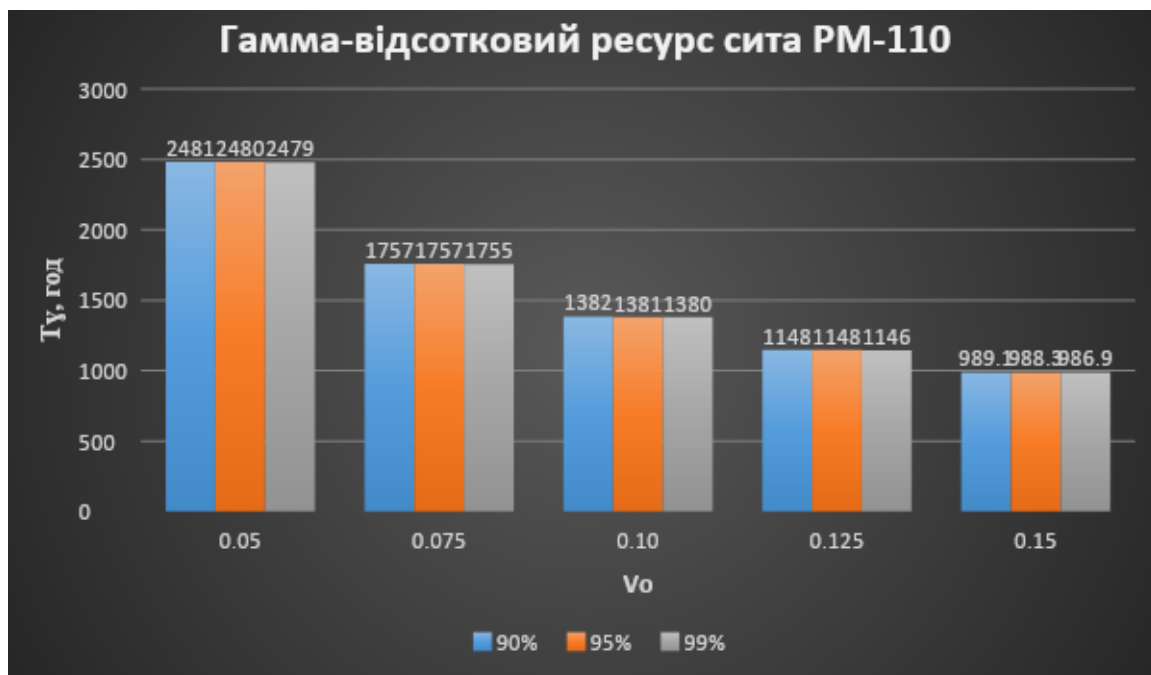


Рисунок 4.8 – Залежність між чинниками для сита машини РМ-110

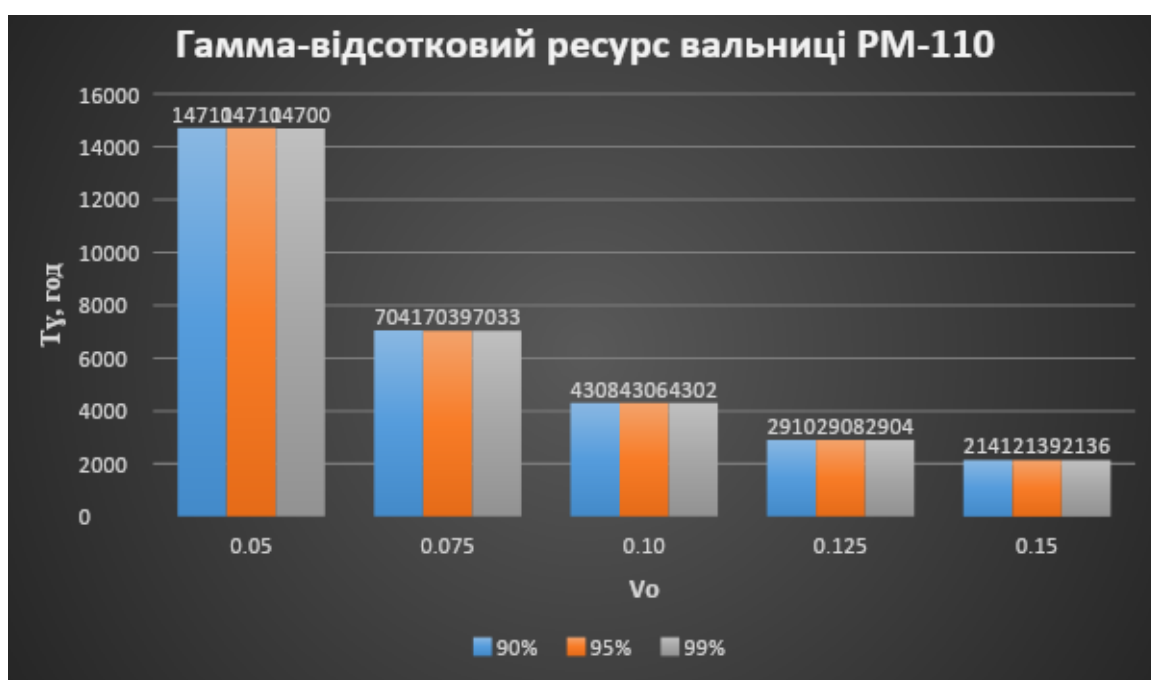


Рисунок 4.9 – Залежність між чинниками для вальниці машини РМ-110

Для повноти аналізу, нами було вирішено прийняти три значення довірчої ймовірності $\gamma=90\%$, $\gamma=95\%$ та $\gamma=99\%$. Це означає, що при ймовірності безвідмовної роботи, наприклад, барабана рубальної машини РМ-75 (рис. 4.2), $\gamma=90\%$, 90 % таких барабанів буде працювати безвідмовно протягом 23750 годин, при коефіцієнті варіації $\sigma_o=0.1$, проте 10 % барабанів відмовлять. Як

видно з даної діаграми, при тому ж коефіцієнті варіації, але з ймовірністю $\gamma=99\%$, 99 % барабанів буде працювати вже 23710 годин, при цьому всього 1 % барабанів вийде з ладу. Таким чином, аналізуючи кожну з діаграм (рис. 4.2 – 4.9), приходимо до висновку, що зі зростанням відсотка працюючих машин, їхній ресурс роботи буде зменшуватися. При цьому вплив коефіцієнтів варіації статичного процесу руйнування залишається не лінійним за тих самих причин, що й при його залежності від середнього ресурсу T_{cp} (див. рис. 4.1).

4.2. Зведені результати формування потоку замін деталей

Для зручності порівняння та подальшого аналізу, зведемо дані проведених розрахунків в таблицю 4.1:

Таблиця 4.1

Результати розрахунку періодичностей замін (ремонтів) деталей
маханізму різання барабанних рубальних машин РМ-75 та РМ-110

| Кі-сть ремонт них циклів | Барабан | | | Контрніж | | | Сито | | | Вальниця | | |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------|---|--------------------|------------------------------|---|--------------------|--------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------|---|
| | F'_p раз и | t $t^{(1)}_p$ рок и | Y j , p a z и | F'_p раз и | $t^{(1)}_j$, рок и | Y j , p a z и | F'_p раз и | t $t^{(1)}_p$ рок и | Y j , p a z и | F'_j , раз и | t $t^{(1)}_p$ рок и | Y j , p a z и |
| | | | | | | | | | | | | |

| PM-75 | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|---|------------------|------|------|-----------------------|---|------|------------------|---|------|------------------|
| 1 | 2 | 4 | 1 . 3 4 | 17 | 0.18 | 1 8 . 7 7 | 5 | 0.69 | 5 . 2 2 | 3 | 1.08 | 3 . 5 6 |
| 2 | | 2 | 1 . 3 4 | 17 | 5.94 | 1 8 . 7 7 | 4 | 4.14 | 5 . 2 2 | 3 | 5.40 | 3 . 5 6 |
| PM-110 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | 3 | 1 . 1 7 | 16.3 | 0.12 | 1 8 . 6 1 | 5 | 0.47 | 5 . 0 7 | 3 | 0.74 | 3 . 3 9 |
| 2 | | 6 | 1 . 1 7 | 16.3 | 3 | 1 8 . 6 1 | 4 | 2.82 | 5 . 0 7 | 3 | 2.96 | 3 . 3 9 |
| 3 | | 9 | 1 . 1 7 | 16.3 | 5.88 | 1 8 . 6 1 | 4 | 5.64 | 5 . 0 7 | 3 | 5.92 | 3 . 3 9 |

Таким чином, аналізуючи таблицю 4.1 за деталями, бачимо наступне: барабан машини PM-75 за 6 років експлуатування до її списання, буде замінюватись (ремонтуватись) всього 2 рази. Перша заміна відбудеться через 4

роки. Контрніж в даній машині буде замінений *34 рази*. Перша його заміна відбудеться через *0.18 роки*, а остання – після *5.94 роки*. Деталь сито – замінене *9 разів*, перша заміна – через *0.69 роки*, остання – *4.14 роки*. Відповідно остання деталь – вальниця (комплект *2 штуки*), замінена *6 разів*, через *1.08 роки* перша заміна та *5.40 роки* - остання.

Рубальна машина РМ-110: барабан буде замінюватись (ремонтуватись) всього *3 рази*. Перша заміна відбудеться через *3 роки*. Контрніж в даній машині буде замінений *49 разів*. Перша його заміна відбудеться через *0.12 роки*, а остання – після *5.88 роки*. Деталь сито – замінене *13 разів*, перша заміна – через *0.47 роки*, остання – *5.64 роки*. Вальниця (комплект *2 штуки*), замінена *9 разів*, через *0.74 роки* перша заміна та *5.92 роки* - остання.

4.3. Розробка технологічного процесу відновлення деталей рубальних машин

Загально відомо, що однією з вимог, що їх ставляться до машин в цілому, є ремонтпридатність її деталей, вузлів та механізмів. Що стосується рубальних машин, тут різноманітність деталей в кожному механізмі дуже велика. Відповідно є деталі чи елементи, відновлювати які є не раціонально, до таких елементів можна віднести: вальниці, втулки (стандартизованих розмірів), різноманітні кріпильні елементи (болти, гайки, шпильки, тощо), шестерні, зірочки та шківні малих та середніх діаметрів, паси, ланцюги. Такі та деякі інші елементи та деталі рентабельно буде замінити на нові, а ніж ремонтувати.

Проте до складу механізмів машин входять, також деталі, міняти на нові які, буде не те що економічно не доцільно, але й зовсім не раціонально. До таких деталей, в основному відносяться наступні: подаючі конвеєри, вальці, ножі, контрножі, сита, барабани, тощо. Для даних деталей, на більшості виробництв передбачений ремонт, або процес відновлення деталей чи їх

поверхонь. Як правило, відновлення даних деталей залежить напряму від характеру їх пошкодження чи зношування. В таблиці 4.2 наведено розповсюджені методи відновлювання поверхонь деталей в залежності від їх пошкоджень.

Таблиця 4.2

Можливі способи відновлення поверхонь металевих виробів

| | Назва і характер пошкодження чи зносу | Можливі способи усунення |
|---|---|--|
| 1 | Зношення шліців чи шпонкового паза по товщині | 1) Ручне електродугове заплавлення з наступною мех. обробкою. 2) Обробка до ремонтного розміру |
| 2 | Зношення поверхні під манжету, зношення поверхні сита, виникнення глибоких подряпин | 1) Вібродугове наплавлення з наступною мех. обробкою 2) Обробка до ремонтного розміру |
| 3 | Зношення поверхні під вальницю | 1) Вібродугове наплавлення з наступною мех. обробкою. 2) Електроконтактне приварення металевої стрічки. |
| 4 | Зношування (розбивання) калібрувальних отворів сита | 1) Вібродугове наплавлення з наступною мех. обробкою. 2) Встановлення ремонтних втулок |
| 5 | Виникнення видимих тріщин на зварних швах чи на тілі металу | 1) Ручне електродугове заплавлення з попереднім розділом крайок та наступною мех. обробкою шва. |

З таблиці 4.2 бачимо, що існує велика кількість способів відновлювання деталей, як і можливих видів пошкоджень чи дефектів. Варто зазначити, що повторюваність поломок чи спрацювань, їх циклічність, залежать, великою мірою, від наявності в структурі металу мікротріщин, повітряних чи шлакових пустот та інших дефектів.

Розглядаючи в такому контексті нашу групу деталей, відомо, що ремонтпридатними серед них є барабан, сито та контрніж. Остання деталь, в силу простоти відновлення свого працездатного стану (перезагострення), не

розглядається. Катедрою ТМТС встановлено найбільш розповсюджені поломки, що стосуються барабанів та сит рубальних машин. До них належать: зношення посадки під вальницю на шипі вала барабана; зминання крайки шпонкового паза в місці напресування шківів на вал; поява втомних мікротріщин на місцях зварювання та в об'ємі металу; спрацювання робочої поверхні сита, з подальшою появою на ній глибоких подряпин та задирів.

Виходячи з зазначеного вище, розробимо технологічні процеси відновлювання працездатного стану барабана та сита рубальних машин. Для зручності послідовність технологічних операцій занесемо в таблиці 4.3 та 4.4.

4.3.1. Технологічний процес відновлення барабана

Таблиця 4.3

План технологічного процесу відновлювання циліндричної поверхні шипа вала барабана

| № операції | Назва і зміст операції | Обладнання для ремонту |
|------------|---|--|
| 005 | Заплавлювальна (ручне електродугове заплавлення поверхні по колу) | Зварювальний інвертор Kaiser NBC-250 Profi |
| 010 | Відпалювальна (нормалізація наплавленої поверхні) | СНО 150/1100 І4А |
| 015 | Токарна (чорнове точіння) | Токарно – гвинтонарізний 16К20 |
| 020 | Токарна (чистова обробка до номінального розміру) | Токарно – гвинтонарізний 16К20 |
| 025 | Контрольна (контроль поверхні) | Мікрометр 50-75 мм |

4.3.2. Технологічний процес відновлення сита

Таблиця 4.4

План технологічного процесу відновлювання робочої поверхні сита

| № операції | Назва і зміст операції | Обладнання для ремонту |
|------------|---|--|
| 005 | Кріпильна (закріплення сита на профільній площині) | Чавунна плита для притирання, шаблони, струбцини |
| 010 | Заплавлювальна (ручне електродугове заплавлення поверхні) | Зварювальний інвертор Kaiser NBC-250 Profi |
| 015 | Відпалювальна (нормалізація наплавленої поверхні) | СНО 150/1100 I4A |
| 020 | Токарна (чорнове точіння) | Карусельно-токарний верстат 1517, оправка |
| 025 | Токарна (чистова обробка до номінального розміру) | Карусельно-токарний верстат 1517, оправка |
| 030 | Контрольна (контроль поверхні) | Шаблон, набір щупів |

4.4. Економічний ефект відновлення складових механізму різання рубальних машин

Вартість відновлювання деталей рубальної машини включає в себе витрати на заробітну плату працівників, а також витрати на енерго-, та матеріалозабезпечення. Витрати на ЗП працівників визначимо на основі погодинної оплати праці, для окремих спеціалістів. Для визначення погодинної оплати праці розділимо середню місячну заробітну плату кожного з робітників на кількість робочих годин у місяці:

$$ЗП_{\Gamma} = \frac{ЗП_{\text{м}}}{\Gamma}, \quad (4.1)$$

Де $ЗП_{\text{м}}$ – місячна заробітна плата, $ЗП_{\text{м}} \approx 21500$ грн;

Γ – кі-сть робочих годин у місяці;

$$ЗП_r = \frac{21500}{176} = 122.15 \text{ грн} \quad (4.2)$$

Витрати на електрозабезпечення дорівнюватимуть $E = 2.64 \text{ грн/кВт*год}$, згідно фіксованої ціни на електроенергію.

Отже приблизна вартість однієї технологічної операції становитиме:

$$B_{on} = ЗП_z + (E \times 7) = 122.15 + (2.64 \times 7) = 140.63 \text{ грн} \quad (4.3)$$

Визначимо вартість повного ремонту кожної з деталей рубальної машини РМ-75:

$$B_{рем} = B_{on} \times Z, \quad (4.4)$$

де Z – кількість технологічних операцій у технологічному процесі відновлення конкретної деталі.

Для барабана:

$$B_{рем} = 140.63 \times 5 = 703.15 \text{ грн} \quad (4.5)$$

Для сита:

$$B_{рем} = 140.63 \times 6 = 843.78 \text{ грн} \quad (4.6)$$

Для аналізу рентабельності проведення саме ремонту вказаних деталей, порівняємо вартість нових деталей з вартістю відновлення кожної з них. У табл. 4.5 наведено актуальні ціни, станом на кінець 2023 року, щодо вартості нових деталей рубальної машини.

Таблиця 4.5

Вартість деяких нових деталей і запчастин для рубальної машини

| Назва деталі / запчастини | Вартість нової деталі, грн | Вартість відновлення деталі, грн |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Вальниця | 1173.12 | - |
| Контрніж | 2500 | - |
| Сито | ≈ 6000 | 843.78 |
| Барабан | ≈ 15000 | 703.15 |

Аналізуючи таблицю 4.5, бачимо, що вартість відновлення барабана рубальної машини у 21.3 рази менша, ніж вартість нової деталі, в свою чергу відновлення сита у 7 разів дешевше, ніж приблизна вартість нової запчастини. Підсумовуючи все вище сказане, приходимо до висновку, що економічно доцільніше проводити відновлення деталей механізму різання рубальної машини, ніж їх повну заміну на нові деталі.

4.5. Практичні рекомендації щодо експлуатування

Після проведення всіх підготовчих робіт інструменту та налагоджувальних робіт, виходячи з аналізу результатів розрахунків, обидві рубальні машини можна використовувати для подрібнювання сировини різних порід та різної структури і твердості. Найкраще буде відбуватися процес подрібнювання, в якому м'яка сировина буде перемішана з твердішою у рівних пропорціях. Така організація циклу роботи машин, дозволить дещо знівелювати удари при різанні, оскільки м'якіша деревина буде виступати в ролі своєрідного демпфера при перервному процесі різання. На нашу думку організація такого процесу подрібнювання дасть можливість збільшити ресурс роботи конрножа машини РМ-75 на 39,7 %, а машини РМ-110 на 34,6 % (див. табл. 3.2, 3.6). Відсоток взятий від різниці середнього ресурсу при $v_o = 0.075$ та середнього ресурсу при $v_o = 0.125$ для обидвох ножів. Під час удару ножа об м'якший матеріал, відбувається певне поглинання сили удару деревиною, в порівнянні з

ударом ножа об дещо твердіший матеріал (рис. 4.10). Реакція опори Ra , тобто контрножа, буде меншою по значенню, а отже навантаження, яке витримує контрніж менше. Відповідно виходячи з залежності на рис.4.1, середній ресурс T_{cp} контрножів при меншому значенні коефіцієнта варіації v_o , більший.

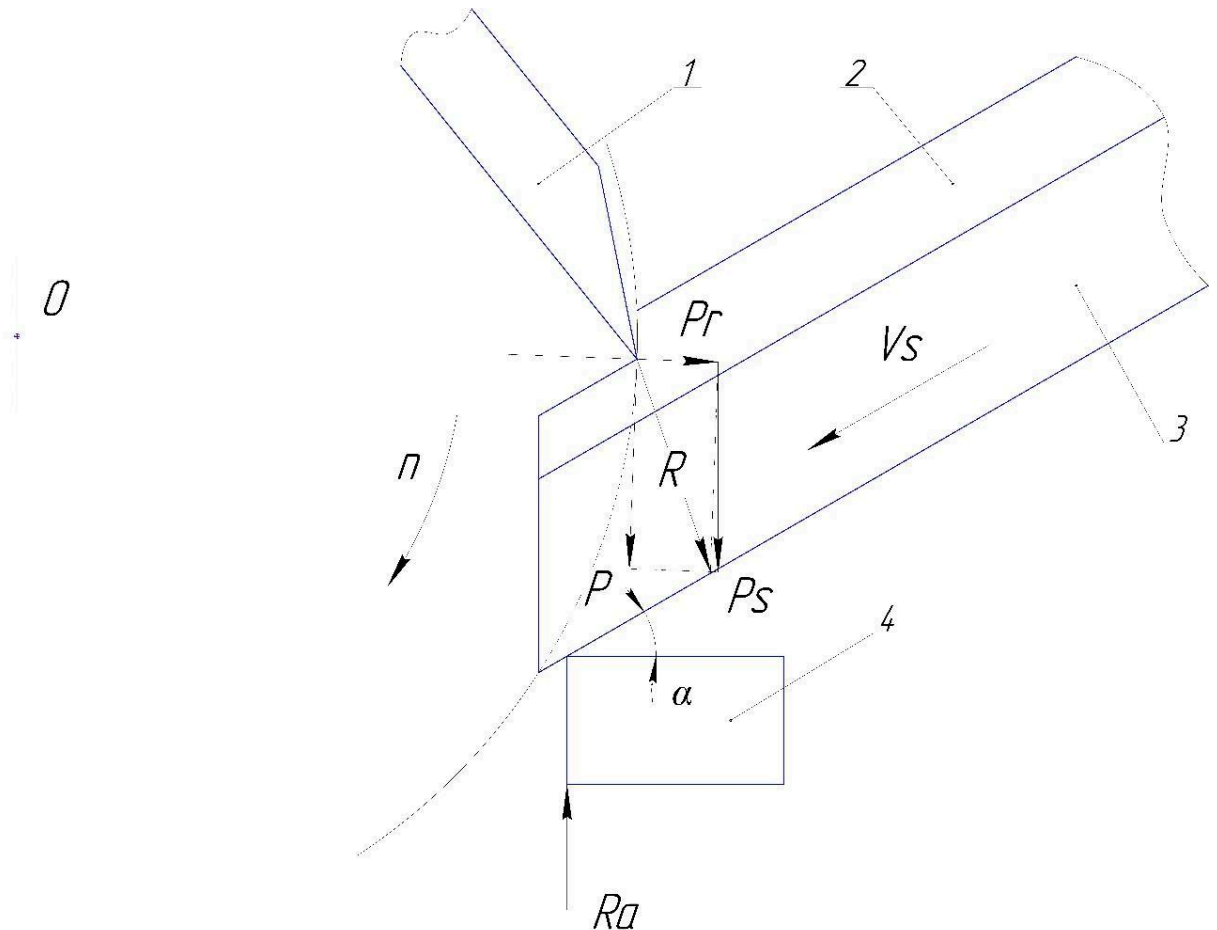


Рисунок 4.10 – Схема дії сил при ударі ножа об м'який матеріал

1 – ніж; 2 – сировина м'якішої структури; 3 – сировина твердішої структури; 4 –контрніж. V_s – рух подавання; n – головний рух; α – кут нахилу сировини до площини; P_r – нормальна складова сили різання; P – дотична складова сили різання; Ra – реакція опори.

Також, для збільшення працездатності сит рубальних машин РМ-75 та РМ-110, рекомендується проводити поверхневе зміцнювання їхньої робочої площини. Це сприятиме збільшенню стійкості сита до спрацювання, а також скоротить кількість ремонтних циклів.

4.6. Висновки до розділу

1. Проаналізовано результати показників надійності рубальних машин, а також підсумовано періодичності замін чи ремонтів складових механізму різання. За основу для показників надійності можна приймати ті, які розраховані при середньому значенні коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування $v_o = 0.1$.

2. Спрогнозовано види ймовірних відмов ремонтпридатних деталей механізму різання рубальної машини такі як, барабан та сито. Складено технологічні процеси відновлення їх працездатності.

3. Розраховано економічний ефект відновлення деталей. Визначено економічну доцільність проведення саме відновлення деяких деталей, а не їхню заміну на нові вироби. Економія при ремонті становить *5156.22 грн* для сит, та *14296.85 грн* для барабанів.

4. Надано деякі рекомендації стосовно переробляння сировини та подовження довговічності деталей механізму різання розглянутих рубальних машин. А саме попереднє змішування твердих та м'яких матеріалів перед їх подрібнюванням, та застосування поверхневого зміцнювання для ножів та контрножів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано актуальність досліджень, проаналізовано стан питання, визначено мету та завдання наукової роботи.

2. Встановлено залежність середнього ресурсу T_{cp} та гамма-відсоткового ресурсу T_{γ} деталей в певних межах довірчої ймовірності, від коефіцієнта варіації статичного процесу руйнування деталей та діючих на них навантажень.

3. З результатів проведених розрахунків встановлено, що на довговічність деталей механізмів різання рубальних машин, питома навантаження, що діє на деталі, чинить більший вплив, ніж процеси різання (перервне чи безперервне). Статичне руйнування значно впливає на термін служби деталей, при цьому залежність між ними не пряmolінійна.

4. Сформовано потік замін деталей та запасних частин рубальних машин. Визначено економічну доцільність проведення відновлення сит та барабанів рубальних машин, а не їхню заміну на нові вироби. Економія при ремонті становить *5156.22 грн* для сит, та *14296.85 грн* для барабанів.

5. Запропоновано процес підготовки відходів деревини та деревинних матеріалів, який полягає у змішуванні відходів твердих та м'яких порід в рівних пропорціях. Це дасть змогу збільшити ресурс роботи контрножа машини РМ-75 на 39,7 %, а контрножа машини РМ-110 на 34,6 % за рахунок демпферних властивостей м'якішого матеріалу.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. **Кійко О.А., Гайда С.В., Кшивецький Б.Я., Кушпіт А.С.** Методичні рекомендації для підготовки магістерської роботи для слухачів магістратури за

напрямом підготовки 6.051801 «Деревооброблювальні технології» зі спеціальності 8.05180102 «Технології виробів з деревини». – Львів: НЛТУ України, 2015. – 39 с.

2. **Пилипчук М. І., Бурдяк М. Р.** Устаткування виробництва стружкових плит: Навчальний посібник. / М. І. Пилипчук, М. Р. Бурдяк – Львів : ТЗОВ Дизайн-Студія «Папуга», 2016. – 244 с.

3. **Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Шостак В. В.** Основи наукових досліджень: Підручник. – Знання, 2007. – 270 с.

4. **Шостак В. В., Полоз В. І.** Прогнозування надійності обладнання для виробництва стружкових плит: / Монографія. – Коломия: «Вік», 2011. – 268 с.

5. **Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А.** Основи проектування машин: Довідник для розрахунку надійності машин на стадії проектування. – М.: машинобудування. 1986. – 224 с.

6. **Стадник М. М.** Термопружний стан та міцність тіл з тонкими включеннями довільної жорсткості. – Львів: НЛТУ України; «Дослідно-видавничий центр Наукового товариства ім. Шевченка», 2015. – 316с.

7. **Маковський Н. В., Амалицький В. В., Комаров Г. А., Кузнєцов В. М.** Теорія та конструкції деревообробчих машин: Навчальний посібник. – М.: «Лісова промисловість», 1984. – 552 с.

8. **Гузенков П. Г.** Деталі машин: Посібник для вузів. - М.: «Вища школа», 1975. – 464 с.

9. **Чернавський С. А., Інкович Г. М, інші.** Проектування механічних механічних передач: Навчально- довідникові рекомендації для курсового проектування механічних передач. – М.: «Машинобудування», 1967. – 799 с.

10. **Гуляєв А. П.** та інші. Інструментальні сталі: Довідник. – М.: «Машинобудування», 1975. – 272 с.

11. **Сюньєв В. С.** Деревинозаготовчі машини з виду біоенергетики: констрекції, розрахунок: Навчальний посібник. - Йоеісуу: НІІ ліси Фінляндії: «METLA», 2011. – 143 с.

12. **Dr. Hans Hartman.** Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. - Abteilung Öffentlichkeitsarbeit, 2013. – 195 s.

13. **Черновол М. І.** Практична робота №2: Визначення показників надійності технологічних систем при нормальному законі розподілу: Методичні вказівки. – За заг. ред М. І. Черновола. – Кіровоград: КНТУ України, 2010. – 19 с.

14. **Жученко А. І., Ярошук Л. Д.** Статистичні методи. Теорія оцінювання та статистичні гіпотези: Лабораторний практикум. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 58 с.

15. **Радловський А. В.** Дослідження показників надійності обладнання для подрібнення деревини: магістерська робота : спец. 8.090219 / А. В. Радловський. – Львів: НЛТУ України, 1999. – 95 с.

16. **Кірик М. Д.** Технологічні основи підвищення стійкості проти спрацювання дереворізального інструменту з високовуглецевих та низьколегованих інструментальних сталей: дис. док. тех. наук: 05.05.07 / Кірик Микола Дмитрович. – Львів, 1996. – 291 с.

17. **ДСТУ 2860-94.** Надійність техніки. Терміни та визначення (ГОСТ 27.002, ІЕС 50 (191)) – Вид. офіц. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 38 с. – Текст укр. мовою. – Дата введення в дію 01.01.1996.

18. **ДСТУ 2862-94.** Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – Вид. офіц. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 32 с. – Текст укр. мовою. – Дата введення в дію 01.01.1996.

19. **ДСТУ 2863-94.** Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. – Вид. офіц. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 39 с. – Текст укр. мовою. – Дата введення в дію 01.01.1996.

20. **Bio.ukr.bio.** – інформаційний портал про тверде біопаливо та обладнання. <https://bio.ukr.bio/ua/advert>.

ДОДАТКИ

Додаток А. Розрахунки показників надійності деталей та елементів рубальної машини РМ-75 в середовищі Mathcad

$$up := 0.49$$

$$ap1 := 1 + 0.05^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1$$

$$at1 := \left(\frac{ap1}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.05^2]}{(3-1) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.05^2]}{(3) \cdot 2} \right] \right] - 3.75 \times 10^{-3}$$

$$Креж1 := \frac{ap1}{3.75 \times 10^{-3}} = 266.66$$

$$M1 := \left[\frac{(Креж1 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{73.151} \right) = 9.423 \times 10^4$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 6.663 \times 10^4$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$Тср1 := M1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 9.447 \times 10^4$$

$$\sigma1 := \frac{(v1 \cdot Тср1)}{100} = 66.799$$

$$Т\gamma(90)-1 := Тср1 - 1.281 \cdot \sigma1 = 9.438 \times 10^4$$

$$Т\gamma(95)1 := Тср1 - 1.644 \cdot \sigma1 = 9.436 \times 10^4$$

$$Т\gamma(99)1 := Тср1 - 2.326 \cdot \sigma1 = 9.431 \times 10^4$$

$$ap2 := 1 + 0.075^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1$$

$$a2 := \left(\frac{ap2}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.075^2]}{(3-1) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.075^2]}{(3) \cdot 2} \right] \right] = 8.437 \times 10^{-3}$$

$$Креж2 := \frac{ap2}{8.437 \times 10^{-3}} = 118.519$$

$$M2 := \left[\frac{(Креж2 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{73.151} \right) = 4.188 \times 10^4$$

$$m2 := \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.962 \times 10^4$$

$$v2 := M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106$$

$$Тср2 := M2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 4.212 \times 10^4$$

$$\sigma2 := \frac{(v2 \cdot Тср2)}{100} = 44.673$$

$$Т\gamma(90)-2 := Тср2 - 1.281 \cdot \sigma2 = 4.206 \times 10^4$$

$$Т\gamma(95)2 := Тср2 - 1.644 \cdot \sigma2 = 4.204 \times 10^4$$

$$Т\gamma(99)2 := Тср2 - 2.326 \cdot \sigma2 = 4.201 \times 10^4$$

Рисунок А1 – Показники надійності барабана при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$ap3 := 1 + 0.1^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot up \cdot \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1$$

$$at3 := \left(\frac{ap3}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.1^2]}{(3-1) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.1^2]}{(3) \cdot 2} \right] \right] - 0.015$$

$$Креж3 := \frac{ap3}{0.015} = 66.66$$

$$M3 := \left[\frac{(Креж3 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{73.151} \right) = 2.356 \times 10^4$$

$$m3 := \left[\sum_{i=1}^0 (M3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.666 \times 10^4$$

$$v3 := M3 \cdot (0.1^2 \cdot m3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141$$

$$Тр3 := M3 \cdot \left[1 + \left(\frac{v3^2}{2} \right) \right] = 2.379 \times 10^4$$

$$\sigma3 := \frac{(v3 \cdot Тр3)}{100} = 33.647$$

$$Т\gamma(90)3 := Тр3 - 1.281 \cdot \sigma3 = 2.375 \times 10^4$$

$$Т\gamma(95)3 := Тр3 - 1.644 \cdot \sigma3 = 2.374 \times 10^4$$

$$Т\gamma(99)3 := Тр3 - 2.326 \cdot \sigma3 = \blacksquare$$

$$ap4 := 1 + 0.125^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot up \cdot \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1$$

$$at4 := \left(\frac{ap4}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.125^2]}{(3-1) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.125^2]}{(3) \cdot 2} \right] \right] - 0.023$$

$$Креж4 := \frac{ap4}{0.023} = 43.471$$

$$M4 := \left[\frac{(Креж4 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{73.151} \right) = 1.536 \times 10^4$$

$$m4 := \left[\sum_{i=1}^0 (M4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.086 \times 10^4$$

$$v4 := M4 \cdot (0.125^2 \cdot m4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177$$

$$Тр4 := M4 \cdot \left[1 + \left(\frac{v4^2}{2} \right) \right] = 1.56 \times 10^4$$

$$\sigma4 := \frac{(v4 \cdot Тр4)}{100} = 27.581$$

$$Т\gamma(90)4 := Тр4 - 1.281 \cdot \sigma4 = 1.557 \times 10^4$$

$$Т\gamma(95)4 := Тр4 - 1.644 \cdot \sigma4 = 1.556 \times 10^4$$

$$Т\gamma(99)4 := Тр4 - 2.326 \cdot \sigma4 = 1.554 \times 10^4$$

Рисунок А2 – Показники надійності барабана при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$ap5 := 1 + 0.15^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot up^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] - 1$$

$$at5 := \left(\frac{ap5}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \frac{[(3-i) \cdot 0.15^{2i}]}{(3-i) \cdot 2} + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3) \cdot 0.15^{2i}]}{(3) \cdot 2} \right] = 0.034$$

$$Креж5 := \frac{ap5}{0.034} = 29.405$$

$$M5 := \left[\frac{(Креж5 \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{550}{73.151} \right) = 1.039 \times 10^4$$

$$m5 := \left[\sum_{i=1}^0 (M5^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 7.348 \times 10^3$$

$$v5 := M5 \cdot (0.15^2 \cdot m5^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212$$

$$Трп5 := M5 \cdot \left[1 + \left(\frac{v5^2}{2} \right) \right] = 1.062 \times 10^4$$

$$\sigma5 := \frac{(v5 \cdot Трп5)}{100} = 22.539$$

$$Т\gamma(90)5 := Трп5 - 1.281 \cdot \sigma5 = 1.06 \times 10^4$$

$$Т\gamma(95)5 := Трп5 - 1.644 \cdot \sigma5 = 1.059 \times 10^4$$

$$Т\gamma(99)5 := Трп5 - 2.326 \cdot \sigma5 = 1.057 \times 10^4$$

Рисунок А3 – Показники надійності барабана при $v_o = 0.15$.

$$u_p := 0.29$$

$$u_p^1 := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left(\frac{0.05^2 \cdot u_p^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 1$$

$$m_1 := \left(\frac{u_p^1}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.05^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.05^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.384$$

$$k_{p \text{ emf}} := \frac{u_p^1}{0.384} = 2.603$$

$$M_1 := \left[\frac{(k_{p \text{ emf}} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{73.151} \right) = 935.031$$

$$m_1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M_1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 661.167$$

$$v_1 := M_1 \cdot (0.05^2 \cdot m_1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$T_{ep}^1 := M_1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v_1^2}{2} \right) \right] = 937.368$$

$$m^1 := \frac{(v_1 \cdot T_{ep}^1)}{100} = 0.663$$

$$T_{\gamma}(90) \cdot 1 := T_{ep}^1 - 1.281 \cdot m^1 = 936.519$$

$$T_{\gamma}(95) \cdot 1 := T_{ep}^1 - 1.644 \cdot m^1 = 936.279$$

$$T_{\gamma}(99) \cdot 1 := T_{ep}^1 - 2.326 \cdot m^1 = 935.827$$

$$\begin{aligned}
sp2 &:= 1 + 0.075^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 0.999 \\
m2 &:= \left(\frac{sp2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.057^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.075^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.501 \\
Kpем2 &:= \frac{sp2}{0.501} = 1.995 \\
M2 &:= \left[\frac{(Kpем2 \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{73.151} \right) = 716.397 \\
m2 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 506.569 \\
v2 &:= M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106 \\
Tep2 &:= M2 \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 720.427 \\
\alpha2 &:= \frac{(v2 \cdot Tep2)}{100} = 0.764 \\
\tau\gamma(90)2 &:= Tep2 - 1.281 \cdot \alpha2 = 719.448 \\
\tau\gamma(95)2 &:= Tep2 - 1.644 \cdot \alpha2 = 719.171 \\
\tau\gamma(99)2 &:= Tep2 - 2.326 \cdot \alpha2 = 718.65
\end{aligned}$$

Рисунок А4 – Показники надійності контрножа при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$\begin{aligned}
sp3 &:= 1 + 0.1^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 0.999 \\
m3 &:= \left(\frac{sp3}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.1^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.1^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.693 \\
Kpем3 &:= \frac{sp3}{0.693} = 1.441 \\
M3 &:= \left[\frac{(Kpем3 \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{73.151} \right) = 517.639 \\
m3 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 366.026 \\
v3 &:= M3 \cdot (0.1^2 \cdot m3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \\
Tep3 &:= M3 \left[1 + \left(\frac{v3^2}{2} \right) \right] = 522.815 \\
\alpha3 &:= \frac{(v3 \cdot Tep3)}{100} = 0.739 \\
\tau\gamma(90)3 &:= Tep3 - 1.281 \cdot \alpha3 = 521.868 \\
\tau\gamma(95)3 &:= Tep3 - 1.644 \cdot \alpha3 = 521.6 \\
\tau\gamma(99)3 &:= Tep3 - 2.326 \cdot \alpha3 = 521.095 \\
sp4 &:= 1 + 0.125^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 0.998 \\
m4 &:= \left(\frac{sp4}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.125^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.125^2 \cdot 0.426]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.837 \\
Kpем4 &:= \frac{sp4}{0.837} = 1.192 \\
M4 &:= \left[\frac{(Kpем4 \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{73.151} \right) = 428.288 \\
m4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 302.846 \\
v4 &:= M4 \cdot (0.125^2 \cdot m4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
Tep4 &:= M4 \left[1 + \left(\frac{v4^2}{2} \right) \right] = 434.98 \\
\alpha4 &:= \frac{(v4 \cdot Tep4)}{100} = 0.769 \\
\tau\gamma(90)4 &:= Tep4 - 1.281 \cdot \alpha4 = 433.995 \\
\tau\gamma(95)4 &:= Tep4 - 1.644 \cdot \alpha4 = 433.716 \\
\tau\gamma(99)4 &:= Tep4 - 2.326 \cdot \alpha4 = 433.192
\end{aligned}$$

Рисунок А5 – Показники надійності контрножа при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
 u_p^2 &:= 1 + 0.15^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 0.997 \\
 m_s &:= \left(\frac{u_p^2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{(3-1+0.426) \cdot 0.15^{2 \cdot 0.426 i}}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{(3+0.426) \cdot 0.15^{2 \cdot 0.426 i}}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.977 \\
 K_{p \cdot m_s} &:= \frac{u_p^2}{0.977} = 1.021 \qquad M_s := \left[\frac{(3 \cdot K_{p \cdot m_s} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{73.151} \right) = 366.608 \\
 m_s &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_s^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 259.231 \\
 v_s &:= M_s \cdot (0.15^2 \cdot m_s^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
 T_{p^2} &:= M_s \left[1 + \left(\frac{v_s^2}{2} \right) \right] = 374.857 \\
 \alpha_s &:= \frac{(v_s \cdot T_{p^2})}{100} = 0.795 \\
 T_{\gamma(90).5} &:= T_{p^2} - 1.281 \cdot \alpha_s = 373.838 \\
 T_{\gamma(95).5} &:= T_{p^2} - 1.644 \cdot \alpha_s = 373.55 \\
 T_{\gamma(99).5} &:= T_{p^2} - 2.326 \cdot \alpha_s = 373.007
 \end{aligned}$$

Рисунок А6 – Показники надійності контрножа при $v_o = 0.15$.

$$u_p := -0.72$$

$$sp1 := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.004$$

$$m1 := \left(\frac{sp1}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.386$$

$$K_{pем1} := \frac{sp1}{0.386} = 2.602$$

$$M1 := \left[\frac{(K_{pем1} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{73.151} \right) = 3.628 \times 10^3$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.566 \times 10^3$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$Tep1 := m1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 3.637 \times 10^3$$

$$m := \frac{(v1 \cdot Tep1)}{100} = 2.572$$

$$T\gamma(90) \cdot 1 := Tep1 - 1.281 \cdot m = 3.634 \times 10^3$$

$$T\gamma(95) \cdot 1 := Tep1 - 1.644 \cdot m = 3.633 \times 10^3$$

$$T\gamma(99) \cdot 1 := Tep1 - 2.326 \cdot m = 3.631 \times 10^3$$

$$sp2 := 1 + 0.075^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.01$$

$$m2 := \left(\frac{sp2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.548$$

$$K_{pем2} := \frac{sp2}{0.548} = 1.843$$

$$M2 := \left[\frac{(K_{pем2} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{73.151} \right) = 2.57 \times 10^3$$

$$m2 := \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.817 \times 10^3$$

$$v2 := M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106$$

$$Tep2 := m2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 2.584 \times 10^3$$

$$m := \frac{(v2 \cdot Tep2)}{100} = 2.741$$

$$T\gamma(90) \cdot 2 := Tep2 - 1.281 \cdot m = 2.581 \times 10^3$$

$$T\gamma(95) \cdot 2 := Tep2 - 1.644 \cdot m = 2.58 \times 10^3$$

$$T\gamma(99) \cdot 2 := Tep2 - 2.326 \cdot m = 2.578 \times 10^3$$

Рисунок А7 – Показники надійності сита при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$\begin{aligned}
 u_p^3 &:= 1 + 0.1^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.018 \\
 m_3 &:= \left(\frac{u_p^3}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.1^2 \cdot 0.426^i]}{0.426 \cdot (3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.1^2 \cdot 0.426^i]}{0.426 \cdot (3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.706 \\
 K_{p=3} &:= \frac{u_p^3}{0.706} = 1.441 & M_3 &:= \left[\frac{(K_{p=3} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{73.151} \right) = 2.01 \times 10^3 \\
 m_3 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.421 \times 10^3 \\
 v_3 &:= M_3 (0.1^2 \cdot m_3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \\
 T_{ep^3} &:= M_3 \left[1 + \left(\frac{v_3^2}{2} \right) \right] = 2.03 \times 10^3 \\
 \sigma^3 &:= \frac{(v_3 \cdot T_{ep^3})}{100} = 2.871 \\
 T_{\gamma(90).3} &:= T_{ep^3} - 1.281 \cdot \sigma^3 = 2.026 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(95).3} &:= T_{ep^3} - 1.644 \cdot \sigma^3 = 2.025 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(99).3} &:= T_{ep^3} - 2.326 \cdot \sigma^3 = 2.023 \times 10^3 \\
 \\
 u_p^4 &:= 1 + 0.125^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.027 \\
 m_4 &:= \left(\frac{u_p^4}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.125^2 \cdot 0.426^i]}{0.426 \cdot (3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.125^2 \cdot 0.426^i]}{0.426 \cdot (3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.862 \\
 K_{p=4} &:= \frac{u_p^4}{0.862} = 1.192 & M_4 &:= \left[\frac{(K_{p=4} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{73.151} \right) = 1.662 \times 10^3 \\
 m_4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.175 \times 10^3 \\
 v_4 &:= M_4 (0.125^2 \cdot m_4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
 T_{ep^4} &:= M_4 \left[1 + \left(\frac{v_4^2}{2} \right) \right] = 1.688 \times 10^3 \\
 \sigma^4 &:= \frac{(v_4 \cdot T_{ep^4})}{100} = 2.984 \\
 T_{\gamma(90).4} &:= T_{ep^4} - 1.281 \cdot \sigma^4 = 1.684 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(95).4} &:= T_{ep^4} - 1.644 \cdot \sigma^4 = 1.683 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(99).4} &:= T_{ep^4} - 2.326 \cdot \sigma^4 = 1.681 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Рисунок А8 – Показники надійності сита при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
 u_p s &:= 1 + 0.15^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.04 \\
 a s &:= \left(\frac{u_p s}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.15^{2 \cdot 0.426 i}]}{0.426(3-1+0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.15^{2 \cdot 0.426 i}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.887 \\
 K_{pmax} s &:= \frac{u_p s}{0.887} = 1.172 & M s &:= \left[\frac{(K_{pmax} s \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{73.151} \right) = 1.634 \times 10^3 \\
 m s &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M s^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.156 \times 10^3 \\
 v s &:= M s (0.15^2 \cdot m s^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
 T_{cp} s &:= M s \left[1 + \left(\frac{v s^2}{2} \right) \right] = 1.671 \times 10^3 \\
 \sigma s &:= \frac{(v s \cdot T_{cp} s)}{100} = 3.545 \\
 T_{\gamma(90)} s &:= T_{cp} s - 1.281 \cdot \sigma s = 1.666 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(95)} s &:= T_{cp} s - 1.644 \cdot \sigma s = 1.665 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(99)} s &:= T_{cp} s - 2.326 \cdot \sigma s = 1.663 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Рисунок А9 – Показники надійності сита при $v_o = 0.15$.

$$u_p := -0.29$$

$$u_{p1} := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.001$$

$$m1 := \left(\frac{u_{p1}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3 - 1 + 0.88) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3 - 1 - 0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3 + 0.88) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3 - 0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.018$$

$$K_{pex1} := \frac{u_{p1}}{0.018} = 55.619$$

$$M1 := \left[\frac{(K_{pex1} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{73.151} \right) = 2.144 \times 10^4$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.516 \times 10^4$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$T_{ep1} := M1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 2.15 \times 10^4$$

$$\sigma^1 := \frac{(v1 \cdot T_{ep1})}{100} = 15.199$$

$$T\gamma(90)1 := T_{ep1} - 1.281 \cdot \sigma^1 = 2.148 \times 10^4$$

$$T\gamma(95)1 := T_{ep1} - 1.644 \cdot \sigma^1 = 2.147 \times 10^4$$

$$T\gamma(99)1 := T_{ep1} - 2.326 \cdot \sigma^1 = 2.146 \times 10^4$$

$$\begin{aligned}
\mu_2 &:= 1 + 0.075^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot u_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.003 \\
\mu_2 &:= \left(\frac{\mu_2^2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.88) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-0.88) \cdot 2} \right] = 0.037 \\
\kappa_{p\mu_2} &:= \frac{\mu_2^2}{0.037} = 27.097 \\
M_2 &:= \left[\frac{(\kappa_{p\mu_2} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{73.151} \right) = 1.045 \times 10^4 \\
m_2 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 7.386 \times 10^3 \\
v_2 &:= M_2 \cdot (0.075^2 \cdot m_2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106 \\
\tau_{ep2} &:= M_2 \left[1 + \left(\frac{v_2^2}{2} \right) \right] = 1.05 \times 10^4 \\
\alpha_2 &:= \frac{(v_2 \cdot \tau_{ep2})}{100} = 11.142 \\
\tau_{\gamma(90)2} &:= \tau_{ep2} - 1.281 \alpha_2 = 1.049 \times 10^4 \\
\tau_{\gamma(95)2} &:= \tau_{ep2} - 1.644 \alpha_2 = 1.049 \times 10^4 \\
\tau_{\gamma(99)2} &:= \tau_{ep2} - 2.326 \alpha_2 = 1.048 \times 10^4
\end{aligned}$$

Рисунок А10 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$\begin{aligned}
\mu_3 &:= 1 + 0.1^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot u_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.005 & \mu_4 &:= 1 + 0.125^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot u_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.007 \\
\mu_3 &:= \left(\frac{\mu_3^2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.1^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.88) \cdot 0.1^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-0.88) \cdot 2} \right] = 0.062 & \mu_4 &:= \left(\frac{\mu_4^2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.125^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.88) \cdot 0.125^{2 \cdot 0.88}]}{0.88(3-0.88) \cdot 2} \right] = 0.092 \\
\kappa_{p\mu_3} &:= \frac{\mu_3^2}{0.062} = 16.203 & M_3 &:= \left[\frac{(\kappa_{p\mu_3} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{73.151} \right) = 6.246 \times 10^3 & \kappa_{p\mu_4} &:= \frac{\mu_4^2}{0.092} = 10.947 & M_4 &:= \left[\frac{(\kappa_{p\mu_4} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{73.151} \right) = 4.22 \times 10^3 \\
m_3 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 4.417 \times 10^3 & m_4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.984 \times 10^3 \\
v_3 &:= M_3 \cdot (0.1^2 \cdot m_3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 & v_4 &:= M_4 \cdot (0.125^2 \cdot m_4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
\tau_{ep3} &:= M_3 \left[1 + \left(\frac{v_3^2}{2} \right) \right] = 6.309 \times 10^3 & \tau_{ep4} &:= M_4 \left[1 + \left(\frac{v_4^2}{2} \right) \right] = 4.286 \times 10^3 \\
\alpha_3 &:= \frac{(v_3 \cdot \tau_{ep3})}{100} = 8.922 & \alpha_4 &:= \frac{(v_4 \cdot \tau_{ep4})}{100} = 7.577 \\
\tau_{\gamma(90)3} &:= \tau_{ep3} - 1.281 \alpha_3 = 6.297 \times 10^3 & \tau_{\gamma(90)4} &:= \tau_{ep4} - 1.281 \alpha_4 = 4.276 \times 10^3 \\
\tau_{\gamma(95)3} &:= \tau_{ep3} - 1.644 \alpha_3 = 6.294 \times 10^3 & \tau_{\gamma(95)4} &:= \tau_{ep4} - 1.644 \alpha_4 = 4.274 \times 10^3 \\
\tau_{\gamma(99)3} &:= \tau_{ep3} - 2.326 \alpha_3 = 6.288 \times 10^3 & \tau_{\gamma(99)4} &:= \tau_{ep4} - 2.326 \alpha_4 = 4.269 \times 10^3
\end{aligned}$$

Рисунок А11 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
 u_p^S &:= 1 + 0.15^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot u_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.01 \\
 m_S &:= \binom{u_p^S}{2} \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.15^{2-0.88}]}{0.88 \cdot (3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.88) \cdot 0.15^{2-0.88}]}{0.88 \cdot (3-0.88) \cdot 2} \right] = 0.127 \\
 \text{Крест}^S &:= \frac{u_p^S}{0.127} = 7.955 & M_S &:= \left[\frac{(\text{Крест}^S \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{73.151} \right) = 3.067 \times 10^3 \\
 m_S &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_S^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.169 \times 10^3 \\
 v_S &:= M_S (0.15^2 \cdot m_S^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
 T_{ep}^S &:= M_S \left[1 + \left(\frac{v_S^2}{2} \right) \right] = 3.136 \times 10^3 \\
 \sigma^S &:= \frac{(v_S \cdot T_{ep}^S)}{100} = 6.652 \\
 \tau\gamma(90)_S &:= T_{ep}^S - 1.281 \cdot \sigma^S = 3.127 \times 10^3 \\
 \tau\gamma(95)_S &:= T_{ep}^S - 1.644 \cdot \sigma^S = 3.125 \times 10^3 \\
 \tau\gamma(99)_S &:= T_{ep}^S - 2.326 \cdot \sigma^S = 3.12 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Рисунок А12 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.15$.

Додаток Б. Розрахунки показників надійності деталей та елементів рубальної машини РМ-110 в середовищі Mathcad

$$u_p = 0.87$$

$$\varphi_1 = 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.002$$

$$\alpha_1 = - \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \frac{1}{(3-1) \cdot 2} \left[\frac{(3-1) \cdot 0.05^{2i}}{(3-1) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{1}{(3) \cdot 2} \left[\frac{(3) \cdot 0.05^{2i}}{(3) \cdot 2} \right] \right] = 3.756 \times 10^{-3}$$

$$K_{pex1} = \frac{\varphi_1}{3.75 \times 10^{-3}} = 267.096$$

$$M_1 = \left[\frac{(K_{pex1} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{550}{107.288} \right) = 6.435 \times 10^4$$

$$m_1 = \left[\sum_{i=1}^0 (M_1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 4.551 \times 10^4$$

$$v_1 = M_1 \cdot (0.05^2 \cdot m_1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$T_{p1} = M_1 \left[1 + \left(\frac{v_1^2}{2} \right) \right] = 6.452 \times 10^4$$

$$\alpha_1 = \frac{(v_1 \cdot T_{p1})}{100} = 45.619$$

$$T_{\gamma(90)}1 = T_{p1} - 1.281 \cdot \alpha_1 = 6.446 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(95)}1 = T_{p1} - 1.644 \cdot \alpha_1 = 6.444 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(99)}1 = T_{p1} - 2.326 \cdot \alpha_1 = 6.441 \times 10^4$$

$$\begin{aligned}
\mu_2 &:= 1 + 0.075^2 \cdot \mu_2^2 - 0.075^2 \cdot \mu_2 \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot \mu_2^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.004 \\
\sigma_2 &:= \left(\frac{\mu_2}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-i) \cdot 0.075^2]^2}{(3-i) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{(3) \cdot 0.075^4}{(3) \cdot 2} \right] \right] = 8.468 \times 10^{-3} \\
\text{Крем}2 &:= \frac{\mu_2}{8.437 \times 10^{-3}} = 118.954 \\
M2 &:= \left[\frac{(\text{Крем}2 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{107.288} \right) = 2.866 \times 10^4 \\
m2 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.027 \times 10^4 \\
v2 &:= M2 \cdot \left(0.075^2 \cdot m2^{-2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.106 \\
\text{Топ}2 &:= M2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 2.882 \times 10^4 \\
\alpha_2 &:= \frac{(v2 \cdot \text{Топ}2)}{100} = 30.57 \\
\text{Т}_\gamma(90)2 &:= \text{Топ}2 - 1.281 \cdot \alpha_2 = 2.878 \times 10^4 \\
\text{Т}_\gamma(95)2 &:= \text{Топ}2 - 1.644 \cdot \alpha_2 = 2.877 \times 10^4 \\
\text{Т}_\gamma(99)2 &:= \text{Топ}2 - 2.326 \cdot \alpha_2 = 2.875 \times 10^4
\end{aligned}$$

Рисунок Б1 – Показники надійності барабана при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$\mu_3 := 1 + 0.1^2 \cdot \mu_2^2 - 0.1^2 \cdot \mu_2 \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot \mu_2^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.006$$

$$\sigma_3 := \left(\frac{\mu_3}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-i) \cdot 0.1^2]}{(3-i) \cdot 2} \right] \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.1^2]}{(3) \cdot 2} \right] = 0.015$$

$$K_{\text{рем}3} := \frac{\mu_3}{0.015} = 67.095$$

$$M_3 := \left[\frac{[K_{\text{рем}3} \cdot 470]}{10} \right] \left(\frac{550}{107288} \right) = 1.617 \times 10^4$$

$$m_3 := \left[\sum_{i=1}^0 (M_3 - 2) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.143 \times 10^4$$

$$v_3 := M_3 \cdot (0.1^2 \cdot m_3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141$$

$$T_{\text{оп}3} := M_3 \left[1 + \left(\frac{v_3^2}{2} \right) \right] = 1.633 \times 10^4$$

$$\sigma_3 := \frac{(v_3 \cdot T_{\text{оп}3})}{100} = 23.091$$

$$T_{\gamma(90)3} := T_{\text{оп}3} - 1.281 \cdot \sigma_3 = 1.63 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(95)3} := T_{\text{оп}3} - 1.644 \cdot \sigma_3 = 1.629 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(99)3} := T_{\text{оп}3} - 2.326 \cdot \sigma_3 = 1.627 \times 10^4$$

$$\begin{aligned}
ap^4 &:= 1 + 0.125^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.01 \\
ap^4 &:= \left(\frac{ap^4}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.125^2]^i}{(3-1)^i \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.125^2]^i}{(3)^i \cdot 2} \right] \right] = 0.024 \\
Kpen^4 &:= \frac{ap^4}{0.023} = 43.915 \quad M^4 := \left[\frac{(Kpen^4 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{107.288} \right) = 1.058 \times 10^4 \\
m^4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M^4)^{-2} \right]^{\frac{-1}{2}} = 7.482 \times 10^3 \\
v^4 &:= M^4 \cdot (0.125^2 \cdot m^4)^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
Top^4 &:= M^4 \cdot \left[1 + \left(\frac{v^4}{2} \right) \right] = 1.075 \times 10^4 \\
\sigma^4 &:= \frac{(v^4 \cdot Top^4)}{100} = 18.997 \\
T_{\gamma(90)}^4 &:= Top^4 - 1.281 \cdot \sigma^4 = 1.072 \times 10^4 \\
T_{\gamma(95)}^4 &:= Top^4 - 1.644 \cdot \sigma^4 = 1.071 \times 10^4 \\
T_{\gamma(99)}^4 &:= Top^4 - 2.326 \cdot \sigma^4 = 1.07 \times 10^4
\end{aligned}$$

Рисунок Б2 – Показники надійності барабана при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
ap^5 &:= 1 + 0.15^2 \cdot up^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot up \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot up^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.014 \\
ap^5 &:= \left(\frac{ap^5}{2} \right) \cdot \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1) \cdot 0.15^2]^i}{(3-1)^i \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3) \cdot 0.15^2]^i}{(3)^i \cdot 2} \right] \right] = 0.034 \\
Kpen^5 &:= \frac{ap^5}{0.034} = 29.837 \quad M^5 := \left[\frac{(Kpen^5 \cdot 470)}{10} \right] \cdot \left(\frac{550}{107.288} \right) = 7.189 \times 10^3 \\
m^5 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M^5)^{-2} \right]^{\frac{-1}{2}} = 5.083 \times 10^3 \\
v^5 &:= M^5 \cdot (0.15^2 \cdot m^5)^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
Top^5 &:= M^5 \cdot \left[1 + \left(\frac{v^5}{2} \right) \right] = 7.351 \times 10^3 \\
\sigma^5 &:= \frac{(v^5 \cdot Top^5)}{100} = 15.593 \\
T_{\gamma(90)}^5 &:= Top^5 - 1.281 \cdot \sigma^5 = 7.331 \times 10^3 \\
T_{\gamma(95)}^5 &:= Top^5 - 1.644 \cdot \sigma^5 = 7.325 \times 10^3 \\
T_{\gamma(99)}^5 &:= Top^5 - 2.326 \cdot \sigma^5 = 7.314 \times 10^3
\end{aligned}$$

Рисунок БЗ – Показники надійності барабана при $v_o = 0.15$.

Розрахунок середнього ресурсу контролює машини РМ-110

$$u_p := 0.43$$

$$u_{p1} := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1$$

$$m1 := \left(\frac{u_{p1}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.384$$

$$K_{pccm1} := \frac{u_{p1}}{0.384} = 2.604$$

$$M1 := \left[\frac{(K_{pccm1} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{107.288} \right) = 637.62$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 450.865$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$T_{ep1} := M1 \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 639.214$$

$$r1 := \frac{(v1 \cdot T_{ep1})}{100} = 0.452$$

$$T\gamma(90) \cdot 1 := T_{ep1} - 1.281 \cdot r1 = 638.635$$

$$T\gamma(95) \cdot 1 := T_{ep1} - 1.644 \cdot r1 = 638.471$$

$$T\gamma(99) \cdot 1 := T_{ep1} - 2.326 \cdot r1 = 638.163$$

$$u_{p2} := 1 + 0.075^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1$$

$$m2 := \left(\frac{u_{p2}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.543$$

$$K_{pccm2} := \frac{u_{p2}}{0.543} = 1.841$$

$$M2 := \left[\frac{(K_{pccm2} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{107.288} \right) = 450.829$$

$$m2 := \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 318.784$$

$$v2 := M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106$$

$$T_{ep2} := M2 \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 453.365$$

$$r2 := \frac{(v2 \cdot T_{ep2})}{100} = 0.481$$

$$T\gamma(90) \cdot 2 := T_{ep2} - 1.281 \cdot r2 = 452.749$$

$$T\gamma(95) \cdot 2 := T_{ep2} - 1.644 \cdot r2 = 452.574$$

$$T\gamma(99) \cdot 2 := T_{ep2} - 2.326 \cdot r2 = 452.246$$

Рисунок Б4 – Показники надійності контрножа при $\nu_o = 0.05$ та $\nu_o = 0.075$.

$$\begin{aligned}
\alpha p^3 &:= 1 + 0.1^2 \cdot \alpha p^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot \alpha p \left[1 + \left(\frac{0.1^2 \cdot \alpha p^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.999 \\
\alpha s &:= \left(\frac{\alpha p^3}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.1^{2-0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.1^{2-0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.693 \\
\kappa p \alpha s &:= \frac{\alpha p^3}{0.693} = 1.442 & M3 &:= \left[\frac{(\kappa p \alpha s \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{107.288} \right) = 353.153 \\
m3 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 249.717 \\
\nu3 &:= M3 \cdot (0.1^2 \cdot m3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 \\
Tep^3 &:= M3 \left[1 + \left(\frac{\nu3^2}{2} \right) \right] = 356.685 \\
\alpha s &:= \frac{(\nu3 \cdot Tep^3)}{100} = 0.504 \\
T\gamma(90)3 &:= Tep^3 - 1.281 \cdot \alpha s = 356.039 \\
T\gamma(95)3 &:= Tep^3 - 1.644 \cdot \alpha s = 355.856 \\
T\gamma(99)3 &:= Tep^3 - 2.326 \cdot \alpha s = 355.512 \\
\alpha p^4 &:= 1 + 0.125^2 \cdot \alpha p^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot \alpha p \left[1 + \left(\frac{0.125^2 \cdot \alpha p^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.999 \\
\alpha s &:= \left(\frac{\alpha p^4}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.125^{2-0.426}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.125^{2-0.426}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.838 \\
\kappa p \alpha s &:= \frac{\alpha p^4}{0.838} = 1.192 & M4 &:= \left[\frac{(\kappa p \alpha s \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{107.288} \right) = 291.947 \\
m4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 206.438 \\
\nu4 &:= M4 \cdot (0.125^2 \cdot m4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
Tep^4 &:= M4 \left[1 + \left(\frac{\nu4^2}{2} \right) \right] = 296.509 \\
\alpha s &:= \frac{(\nu4 \cdot Tep^4)}{100} = 0.524 \\
T\gamma(90)4 &:= Tep^4 - 1.281 \cdot \alpha s = 295.838 \\
T\gamma(95)4 &:= Tep^4 - 1.644 \cdot \alpha s = 295.647 \\
T\gamma(99)4 &:= Tep^4 - 2.326 \cdot \alpha s = 295.29
\end{aligned}$$

Рисунок Б5 – Показники надійності контрножа при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
 \text{ap}^5 &:= 1 + 0.15^2 \cdot \text{ap}^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot \text{ap} \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot \text{ap}^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 0.999 \\
 \text{ms} &:= \left(\frac{\text{ap}^5}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.15^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.15^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.979 \\
 \text{Kpекс} &:= \frac{\text{ap}^5}{0.979} = 1.02 & \text{MS} &:= \left[\frac{(\text{Kpекс} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{559}{107.288} \right) = 249.796 \\
 \text{ms} &:= \left[\sum_{i=1}^0 (\text{MS}^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 176.632 \\
 \text{vs} &:= \text{MS} \cdot (0.15^2 \cdot \text{ms}^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
 \text{Тep}^5 &:= \text{MS} \left[1 + \left(\frac{\text{vs}^2}{2} \right) \right] = 255.416 \\
 \text{мс} &:= \frac{(\text{vs} \cdot \text{Тep}^5)}{100} = 0.542 \\
 \text{Т}\gamma(90)5 &:= \text{Тep}^5 - 1.281 \cdot \text{мс} = 254.722 \\
 \text{Т}\gamma(95)5 &:= \text{Тep}^5 - 1.644 \cdot \text{мс} = 254.525 \\
 \text{Т}\gamma(99)5 &:= \text{Тep}^5 - 2.326 \cdot \text{мс} = 254.156
 \end{aligned}$$

Рисунок Б6 – Показники надійності контрножа при $v_o = 0.15$.

$$u_p := -0.57$$

$$sp1 := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.003$$

$$st1 := \left(\frac{sp1}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.05^{2+0.426i}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.05^{2+0.426i}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.385$$

$$Kp \cdot st1 := \frac{sp1}{0.385} = 2.605 \quad M1 := \left[\frac{(Kp \cdot st1 \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 2.477 \times 10^3$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.751 \times 10^3$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$Tep1 := M1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 2.483 \times 10^3$$

$$\sigma1 := \frac{(v1 \cdot Tep1)}{100} = 1.756$$

$$T\gamma(90) \cdot 1 := Tep1 - 1.281 \cdot \sigma1 = 2.481 \times 10^3$$

$$T\gamma(95) \cdot 1 := Tep1 - 1.644 \cdot \sigma1 = 2.48 \times 10^3$$

$$T\gamma(99) \cdot 1 := Tep1 - 2.326 \cdot \sigma1 = 2.479 \times 10^3$$

$$sp2 := 1 + 0.075^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.007$$

$$st2 := \left(\frac{sp2}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.075^{2+0.426i}]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.075^{2+0.426i}]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] \right] = 0.547$$

$$Kp \cdot st2 := \frac{sp2}{0.547} = 1.841$$

$$M2 := \left[\frac{(Kp \cdot st2 \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 1.75 \times 10^3$$

$$m2 := \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.237 \times 10^3$$

$$v2 := M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106$$

$$Tep2 := M2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 1.76 \times 10^3$$

$$\sigma2 := \frac{(v2 \cdot Tep2)}{100} = 1.867$$

$$T\gamma(90) \cdot 2 := Tep2 - 1.281 \cdot \sigma2 = 1.757 \times 10^3$$

$$T\gamma(95) \cdot 2 := Tep2 - 1.644 \cdot \sigma2 = 1.757 \times 10^3$$

$$T\gamma(99) \cdot 2 := Tep2 - 2.326 \cdot \sigma2 = 1.755 \times 10^3$$

Рисунок Б7 – Показники надійності сита при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$u_{p3} := 1 + 0.1^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.012$$

$$m3 := \left(\frac{u_{p3}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.1^{2-0.426i}]}{0.426 \cdot (3-1-0.426) \cdot 2} \right] \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.1^{2-0.426i}]}{0.426 \cdot (3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.702$$

$$K_{pcm3} := \frac{u_{p3}}{0.702} = 1.442 \quad M3 := \left[\frac{(K_{pcm3} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 1.371 \times 10^3$$

$$m3 := \left[\sum_{i=1}^0 (M3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 969.312$$

$$v3 := M3 \cdot (0.1^2 \cdot m3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141$$

$$T_{cp3} := M3 \left[1 + \left(\frac{v3^2}{2} \right) \right] = 1.385 \times 10^3$$

$$c3 := \frac{(v3 \cdot T_{cp3})}{100} = 1.958$$

$$T_{\gamma(90)3} := T_{cp3} - 1.281 \cdot c3 = 1.382 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(95)3} := T_{cp3} - 1.644 \cdot c3 = 1.381 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(99)3} := T_{cp3} - 2.326 \cdot c3 = 1.38 \times 10^3$$

$$u_{p4} := 1 + 0.125^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.019$$

$$m4 := \left(\frac{u_{p4}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.125^{2-0.426i}]}{0.426 \cdot (3-1-0.426) \cdot 2} \right] \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.426) \cdot 0.125^{2-0.426i}]}{0.426 \cdot (3-0.426) \cdot 2} \right] = 0.855$$

$$K_{pcm4} := \frac{u_{p4}}{0.855} = 1.192 \quad M4 := \left[\frac{(K_{pcm4} \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 1.133 \times 10^3$$

$$m4 := \left[\sum_{i=1}^0 (M4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 801.253$$

$$v4 := M4 \cdot (0.125^2 \cdot m4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177$$

$$T_{cp4} := M4 \left[1 + \left(\frac{v4^2}{2} \right) \right] = 1.151 \times 10^3$$

$$c4 := \frac{(v4 \cdot T_{cp4})}{100} = 2.054$$

$$T_{\gamma(90)4} := T_{cp4} - 1.281 \cdot c4 = 1.148 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(95)4} := T_{cp4} - 1.644 \cdot c4 = 1.148 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(99)4} := T_{cp4} - 2.326 \cdot c4 = 1.146 \times 10^3$$

Рисунок Б8 – Показники надійності сита при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
u_p^S &:= 1 + 0.15^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.027 \\
m^S &:= \left(\frac{u_p^S}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.426) \cdot 0.15^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-1-0.426) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \frac{[(3+0.426) \cdot 0.15^2 \cdot 0.426^i]}{0.426(3-0.426) \cdot 2} \right] = 1.007 \\
K_{pmax}^S &:= \frac{u_p^S}{1.007} = 1.02 \qquad M^S := \left[\frac{(K_{pmax}^S \cdot 600)}{10} \right] \left(\frac{1700}{107.288} \right) = 970.026 \\
m^S &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M^S)^{-2} \right]^{\frac{-1}{2}} = 685.912 \\
v^S &:= M^S \cdot (0.15^2 \cdot m^S)^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
Tep^S &:= M^S \left[1 + \left(\frac{v^S}{2} \right) \right] = 991.851 \\
\alpha^S &:= \frac{(v^S \cdot Tep^S)}{100} = 2.104 \\
T\gamma(90) \cdot S &:= Tep^S - 1.281 \cdot \alpha^S = 989.156 \\
T\gamma(95) \cdot S &:= Tep^S - 1.644 \cdot \alpha^S = 988.392 \\
T\gamma(99) \cdot S &:= Tep^S - 2.326 \cdot \alpha^S = 986.957
\end{aligned}$$

Рисунок Б9 – Показники надійності сита при $v_o = 0.15$.

$$u_p := 1.38$$

$$u_{p1} := 1 + 0.05^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.05^2 \cdot u_p \cdot \left[1 + \left[\frac{(0.05^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.006$$

$$a_{t1} := \left(\frac{u_{p1}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.88}]}{0.88 \cdot (3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.88) \cdot 0.05^{2 \cdot 0.88}]}{0.88 \cdot (3-0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.018$$

$$K_{pex1} := \frac{u_{p1}}{0.018} = 55.893 \quad M1 := \left[\frac{(K_{pex1} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{107.288} \right) = 1.469 \times 10^4$$

$$m1 := \left[\sum_{i=1}^0 (M1^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.039 \times 10^4$$

$$v1 := M1 \cdot (0.05^2 \cdot m1^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.071$$

$$T_{ep1} := M1 \cdot \left[1 + \left(\frac{v1^2}{2} \right) \right] = 1.473 \times 10^4$$

$$c1 := \frac{(v1 \cdot T_{ep1})}{100} = 10.414$$

$$T_{\gamma(90)1} := T_{ep1} - 1.281 \cdot c1 = 1.471 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(95)1} := T_{ep1} - 1.644 \cdot c1 = 1.471 \times 10^4$$

$$T_{\gamma(99)1} := T_{ep1} - 2.326 \cdot c1 = 1.47 \times 10^4$$

$$u_{p2} := 1 + 0.075^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.075^2 \cdot u_p \cdot \left[1 + \left[\frac{(0.075^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.014$$

$$a_{t2} := \left(\frac{u_{p2}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.88}]}{0.88 \cdot (3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.88) \cdot 0.075^{2 \cdot 0.88}]}{0.88 \cdot (3-0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.038$$

$$K_{pex2} := \frac{u_{p2}}{0.038} = 26.675 \quad M2 := \left[\frac{(K_{pex2} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{107.288} \right) = 7.011 \times 10^3$$

$$m2 := \left[\sum_{i=1}^0 (M2^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 4.958 \times 10^3$$

$$v2 := M2 \cdot (0.075^2 \cdot m2^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.106$$

$$T_{ep2} := M2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v2^2}{2} \right) \right] = 7.051 \times 10^3$$

$$c2 := \frac{(v2 \cdot T_{ep2})}{100} = 7.479$$

$$T_{\gamma(90)2} := T_{ep2} - 1.281 \cdot c2 = 7.041 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(95)2} := T_{ep2} - 1.644 \cdot c2 = 7.039 \times 10^3$$

$$T_{\gamma(99)2} := T_{ep2} - 2.326 \cdot c2 = 7.033 \times 10^3$$

Рисунок Б10 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.05$ та $v_o = 0.075$.

$$\begin{aligned}
 \mu_{p3} &:= 1 + 0.1^2 \cdot \mu_p^2 \cdot 2 - 0.1^2 \cdot \mu_p \left[1 + \left[\frac{(0.1^2 \cdot \mu_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.024 & \mu_{p4} &:= 1 + 0.125^2 \cdot \mu_p^2 \cdot 2 - 0.125^2 \cdot \mu_p \left[1 + \left[\frac{(0.125^2 \cdot \mu_p^2)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 1.038 \\
 \mu_3 &:= \left(\frac{\mu_{p3}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.1^{2-0.88i}]}{0.88(3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.88) \cdot 0.1^{2-0.88i}]}{0.88(3-0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.063 & \mu_4 &:= \left(\frac{\mu_{p4}}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.125^{2-0.88i}]}{0.88(3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.88) \cdot 0.125^{2-0.88i}]}{0.88(3-0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.095 \\
 K_{pcm3} &:= \frac{\mu_{p3}}{0.063} = 16.258 & K_{pcm4} &:= \frac{\mu_{p4}}{0.095} = 10.925 \\
 M_3 &:= \left[\frac{(K_{pcm3} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{107.288} \right) = 4.273 \times 10^3 & M_4 &:= \left[\frac{(K_{pcm4} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{107.288} \right) = 2.872 \times 10^3 \\
 m_3 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_3^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 3.022 \times 10^3 & m_4 &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_4^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 2.03 \times 10^3 \\
 v_3 &:= M_3 (0.1^2 \cdot m_3^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.141 & v_4 &:= M_4 (0.125^2 \cdot m_4^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.177 \\
 T_{cp3} &:= M_3 \left[1 + \left(\frac{v_3^2}{2} \right) \right] = 4.316 \times 10^3 & T_{cp4} &:= M_4 \left[1 + \left(\frac{v_4^2}{2} \right) \right] = 2.916 \times 10^3 \\
 \sigma^3 &:= \frac{(v_3 \cdot T_{cp3})}{100} = 6.104 & \sigma^4 &:= \frac{(v_4 \cdot T_{cp4})}{100} = 5.156 \\
 T_{\gamma(90)3} &:= T_{cp3} - 1.281 \cdot \sigma^3 = 4.308 \times 10^3 & T_{\gamma(90)4} &:= T_{cp4} - 1.281 \cdot \sigma^4 = 2.91 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(95)3} &:= T_{cp3} - 1.644 \cdot \sigma^3 = 4.306 \times 10^3 & T_{\gamma(95)4} &:= T_{cp4} - 1.644 \cdot \sigma^4 = 2.908 \times 10^3 \\
 T_{\gamma(99)3} &:= T_{cp3} - 2.326 \cdot \sigma^3 = 4.302 \times 10^3 & T_{\gamma(99)4} &:= T_{cp4} - 2.326 \cdot \sigma^4 = 2.904 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Рисунок Б11 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.10$ та $v_o = 0.125$.

$$\begin{aligned}
u_p^5 &:= 1 + 0.15^2 \cdot u_p^2 \cdot 2 - 0.15^2 \cdot u_p \left[1 + \left[\frac{(0.15^2 \cdot u_p^2)}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1.054 \\
m_s^5 &:= \left(\frac{u_p^5}{2} \right) \left[\sum_{i=0}^1 \left[\frac{[(3-1+0.88) \cdot 0.15^2 \cdot 0.88^i]}{0.88 \cdot (3-1-0.88) \cdot 2} \right] + \sum_{i=0}^3 \left[\frac{[(3+0.88) \cdot 0.15^2 \cdot 0.88^i]}{0.88 \cdot (3-0.88) \cdot 2} \right] \right] = 0.132 \\
N_{pmax} &:= \frac{u_p^5}{0.132} = 7.989 \qquad M_s := \left[\frac{(N_{pmax} \cdot 470)}{10} \right] \left(\frac{600}{107.288} \right) = 2.1 \times 10^3 \\
m_s &:= \left[\sum_{i=1}^0 (M_s^{-2}) \right]^{\frac{-1}{2}} = 1.485 \times 10^3 \\
v_s &:= M_s \cdot (0.15^2 \cdot m_s^{-2})^{\frac{1}{2}} = 0.212 \\
T_{op}^5 &:= M_s \left[1 + \left(\frac{v_s^2}{2} \right) \right] = 2.147 \times 10^3 \\
\sigma_s &:= \frac{(v_s \cdot T_{op}^5)}{100} = 4.554 \\
\tau_{\gamma(90)}^5 &:= T_{op}^5 - 1.281 \cdot \sigma_s = 2.141 \times 10^3 \\
\tau_{\gamma(95)}^5 &:= T_{op}^5 - 1.644 \cdot \sigma_s = 2.139 \times 10^3 \\
\tau_{\gamma(99)}^5 &:= T_{op}^5 - 2.326 \cdot \sigma_s = 2.136 \times 10^3
\end{aligned}$$

Рисунок Б12 – Показники надійності вальниці при $v_o = 0.15$.

Додаток В. Лістинги програмних кодів для побудови графічних залежностей в середовищі Matlab

Command Window

```

>> R1=50:50:350

R1 =

    50    100    150    200    250    300    350

>> G=((3+(0.29.*7.75))./8).*267.035.^2.*(352.5.^2-((352.5.^2)./R1.^2)-R1.^2);
>> plot(R1,G)
>> grid on
>> title('Розрахункові напруження в барабані')
>> xlabel('R1, мм')
>> ylabel('G, Па')
...

```

Рисунок В1 – Лістинг програмного коду для побудови графіка розподілу напружень в тілі барабана рубальної машини РМ-75

```
Command Window
>> x=[0.05:0.025:0.15]

x =

    0.0500    0.0750    0.1000    0.1250    0.1500

>> y=[94470 64520;42120 28820;23790 16330;15570 10750;10620 7351]

y =

    94470    64520
    42120    28820
    23790    16330
    15570    10750
    10620     7351

>> plot(x,y)
>> grid on
>> title('для барабанів')
>> xlabel('Vo')
>> ylabel('Tcp, год')
```

Рисунок В2 – Лістинг програмного коду для побудови суміщених графіків залежності середнього ресурсу T_{cp} від коефіцієнтів статичного процесу руйнування v_o для барабанів (рис. 4.1, а).

```
Command Window
>> x=[0.05:0.025:0.15]

x =

    0.0500    0.0750    0.1000    0.1250    0.1500

>> y=[937.36 639.214;720.42 453.365;522.82 356.68;434.98 296.509;374.85 255.416]

y =

    937.3600    639.2140
    720.4200    453.3650
    522.8200    356.6800
    434.9800    296.5090
    374.8500    255.4160

>> plot(x,y)
>> grid on
>> title('для контрножів')
>> xlabel('Vo')
>> ylabel('Tcp, год')
```

Рисунок В3 – Лістинг програмного коду для побудови суміщених графіків залежності середнього ресурсу T_{cp} від коефіцієнтів статичного процесу руйнування v_o для контрножів (рис. 4.1, б).

Command Window

```
>> x=[0.05:0.025:0.15]

x =

    0.0500    0.0750    0.1000    0.1250    0.1500

>> y=[3637 2483;2584 1760;2030 1385;1688 1151;1671 991.85]

y =

    1.0e+03 *

    3.6370    2.4830
    2.5840    1.7600
    2.0300    1.3850
    1.6880    1.1510
    1.6710    0.9919

>> plot(x,y)
>> grid on
>> title('для сит')
>> xlabel('Vo')
>> ylabel('Tcp, год')
```

Рисунок В4 – Лістинг програмного коду для побудови суміщених графіків залежності середнього ресурсу T_{cp} від коефіцієнтів статичного процесу руйнування v_o для сит (рис. 4.1, в).

Command Window

```

>> x=[0.05:0.025:0.15]

x =

    0.0500    0.0750    0.1000    0.1250    0.1500

>> y=[21500 14730;10500 7051;6309 4316;4286 2916;3136 2147]

y =

    21500    14730
    10500     7051
     6309     4316
     4286     2916
     3136     2147

>> plot(x,y)
>> grid on
>> title('для вальниць')
>> xlabel('Vo')
>> ylabel('Tcp, год')

```

Рисунок В5 – Лістинг програмного коду для побудови суміщених графіків залежності середнього ресурсу T_{cp} від коефіцієнтів статичного процесу руйнування v_o для вальниць (рис. 4.1, з).

Додаток Г. Визначення квантилів для довірчих ймовірностей в середовищі Excel

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | 90% | | | 95% | | | 99% | |
| 3 | -1,28155 | квантиль | для q=0,1 | -1,64485 | квантиль | для q=0,05 | -2,32635 | квантиль | для q=0,01 | |
| 4 | | | | | | | | | | |

Рисунок Г1 – Визначення квантилів для довірчих ймовірностей $\gamma = 90\%$, $\gamma = 95\%$, $\gamma = 99\%$, гамма-відсоткового ресурсу.