МЕТОДОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ

Монографія

Київ – 2019

УДК 631.3.004.67
ББК 30.3я72
Т34

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 4 від 26 листопада 2019 р.)

Рецензенти:

Голуб Г. А. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри тракторів, автомобілів та біоенергосистем Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ).

Назаренко І. І. – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри машин та обладнання технологічних процесів Київського національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ).

Аулін В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ремонту машин і обладнання Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький).

Тітова Л. Л.
Т27 **Тітова Л. Л., Надточій О. В., Роговський І. Л.** Методологія діагностування двигунів машин для лісотехнічних робіт : монографія. Київ. ПрінтЕко. 2019. 402 с.

ISBN 979-617-7381-44-3

© Тітова Л. Л., Надточій О. В., Роговський І. Л., 2019
© НУБіП України, 2019

В С Т У П

На сучасному етапі розвитку лісогогосподарського виробництва України намітилась тенденція широкого впровадження техніки нового покоління, принципово нових технологій, які забезпечують найбільшу продуктивність і ефективність використання. З кожним роком зростає парк лісогосподарської техніки, ускладнюється їх будова, різко зростають продуктивність та енергонасиченість.

Машини для лісотехнічних робіт, в парку лісогосподарської техніки являються найбільш енергонасиченими машинами. Це накладає велику відповідальність на інженерно-технічну службу господарств по організації їх високопродуктивного використання. До мінімуму повинні бути зведені простої із-за поломок, неправильної експлуатації, передчасного спрацювання деталей та інших причин. Тобто, рівень технічного обслуговування такої складної техніки повинен бути достатньо високим на всіх стадіях використання. Однак, усунення відмов і пов’язані з цим простої наносять значні матеріальні збитки господарствам.

Ефективність використання збиральних агрегатів і комплексів напряму залежить від їх надійності.

Енергетичним засобом лісогосподарської техніки є дизельний двигун внутрішнього згорання, який в значній мірі визначає надійність всієї машини. Надійність двигуна являється основним показником техніко-економічної ефективності. Підвищення моторесурсу двигуна при високій безвідмовності майже рівноцінно збільшенню їх випуску заводами. В зв’язку з цим неабиякого значення набуває скорочення експлуатаційних витрат, пов’язаних з передчасним ремонтом дизелів.

Багатьма дослідниками встановлено, що дизельні двигуни, які поступають в капітальний ремонт на спеціалізовані ремонтні підприємства, мають значний залишковий ресурс, при цьому значення багатьох ресурсних параметрів знаходиться у допустимих межах [3,10,11].

Часто дизелі передчасно направляють в ремонт, базуючись на суб’єктивній оцінці механізатора, при цьому не встановлюючи дійсної

причини, яка призвела до відказу. При цьому в першу чергу замінюються дорогі деталі кривошипно-шатунного механізму (КШМ) та циліндро-поршневої групи (ЦПГ).

Наприклад в роботі [10] відмічено, що 69% дизельних енергетичних установок розбираються до закінчення гарантійного строку служби і тільки 31% дизелів працюють без заміни гільз, поршнів 3 тис. і більше мото.год.

Відмічається також, що двигуни поступають в ремонт із значним залишковим ресурсом деталей циліндро-поршневої групи, приводяться значення спрацювання деталей ЦПГ, які значно менші граничних. При цьому тільки 5% дизелів мають граничне зношення гільз циліндрів.

Впровадження технічного діагностування і прогнозування залишкового ресурсу в практику експлуатації МТП дозволяє скоротити експлуатаційні затрати, пов’язані з передчасним ремонтом тракторних і комбайнових дизелів.

Складовими частинами дизельного двигуна, які визначають необхідність направлення його в капітальний ремонт, є КШМ і ЦПГ [58]. Аналіз існуючих методів і засобів для діагностування ЦПГ дозволив виявити основні їх недоліки. До них відноситься відносно велика трудомісткість діагностування, низька точність вимірювання параметрів та прогнозування залишкового ресурсу.

Суттєвий вклад в розробку наукових і практичних основ, методів і засобів технічного діагностування сільськогосподарських машин внесли вчені ГОСНИТИ, НАТИ, СибИМЭ, Ленінградського, Іркутського, Саратовського, Челябінського, Пензенського сільгоспвузів і других організацій. Особливо слід відмітити таких вчених як: В.М.Міхлін, Н.С.Ждановський, В.И.Бельских, В.А.Аллилуев, А.В.Николаенко, И.А.Ульман, Б.А.Улитовский, И.П.Терских, К.Ю.Скибневский, Биргер И.А., Бухтияров И.Д., Махоткин О.А., Гладков А.К., Керчер Б.М., Подщеколдин М.И., Оксень Г.Д., Соловьев В.И. та ін., які розробили методи та засоби ресурсного діагностування КШМ та ЦПГ двигунів.

Важливим фактором підвищення ефективності використання средньофорсованих дизельних двигунів складної лісогосподарської техніки, є

використання сучасних методів діагностування і прогнозування їх технічного стану.

Найбільш трудомісткими операціями при діагностуванні двигунів являються операції визначення технічного стану ЦПГ. Не дивлячись на значну кількість методів діагностування, вирішити дані проблеми в повному обсязі не вдається по причині відсутності універсальності методу, низької чутливості та інформативності, а також значної похибки вимірювання. Тому розробка такого методу є актуальною.

Робота виконана на кафедрі технічного сервісу та інженерного менеджменту імені М. П. Момотенка НУБіП України у відповідності з планом науково-дослідних робіт за темою “Розробити наукові основи зменшення витрат енергоносіїв на механізованих сільськогосподарських роботах” (№ державної реєстрації 0196 U 001918).

Мета полягає в підвищенні надійності двигуна шляхом удосконалення методу діагностування ЦПГ за параметрами ударних імпульсів, виділених в за резонансній зоні ультразвукового діапазону (на прикладі дизельного двигуна лісогосподарської техніки).

Досягнення цієї мети залежить від ряду питань, які ввійшли до задач досліджень:

- проведення розрахунково-теоретичного аналізу виникнення віброакустичних посилань в ЦПГ стосовно подальшого їх використання для діагностування даного з’єднання;
- теоретичне обґрунтування умов оптимальної фільтрації вібраційного процесу з метою здійснення надійної селекції віброакустичних посилань, виявлення джерела в циклі роботи двигуна і визначення їх положення на часовому інтервалі;
- обґрунтування методу прийняття рішення про технічний стан ЦПГ;
- розробка математичної моделі визначення залишкового ресурсу дизельного двигуна;
- експериментальне підтвердження розробки теоретичних положень і виявлення параметрів віброударних посилань, які однозначно

характеризували б технічний стан ЦПГ дизельного двигуна. Оцінка вибору діагностичних параметрів;

– розгляд шляхів можливої технічної реалізації запропонованого методу.

Предмет і об’єкт дослідження. Предметом проведеного дослідження є діагностування з’єднання “поршень-гільза” дизельних двигунів за віброакустичними параметрами.

Об’єктом досліджень являлись дизельні енергетичні установки машин для лісотехнічних робіт.

Поглиблене вивчення питань досліджуваної проблеми здійснювалося у господарствах Київської області.

Методи і методика дослідження. Методика досліджень базувалася на системному підході, з виділенням функціональної підсистеми “гільза циліндра – поршень”.

Зв’язок параметрів фази і амплітуди виникнення віброударних посилань і зазору в ЦПГ досліджувався на основі теорії малих відхилень за допомогою ПЕОМ при детермінованій і стохастичній зміні факторів.

Рішення задач в цілому досягалося при використанні теорії адаптивного непараметричного синтезу та методу максимальної правдоподібності, що визначає технічний стан ЦПГ в цілому і результатів експериментальних досліджень віброакустичних сигналів записаних в ПЕОМ з використанням пакету ПОС.

Статистичні дані про наробіток дизелів лісогосподарської техніки –1500 збиралися в процесі рядової експлуатації на протязі 4 років в господарствах Київської, Черкаської, Чернігівської, Полтавської, Хмельницької областей. Обробіток статистичних даних здійснювався з використанням пакетів STATISTICA 10, SPSS 12 for Windows 16, Microsoft Excel 2016 та MATHCAD 2016 Pro.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в:

– удосконаленні математичної моделі радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ, що базується на основі теоретично-розрахункового аналізу і відповідає реальному механізму;

– обґрунтуванні можливості діагностування даного з’єднання в зарезонансній зоні ультразвукового діапазону.

– визначенні теоретичної залежності структурного параметру фази від параметру технічного стану (зазору в ЦПГ).

– дослідженні амплітудно-частотних характеристик віброакустичного каналу ЦПГ в ультразвуковому діапазоні на частотах до 100 кГц.

– використанні адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів прийняття рішення в умовах апріорної невизначеності, з розробкою комп’ютерної програми обробітку експериментальних даних.

– використанні отриманих залежностей фази виникнення віброакустичних посилань від зазору для визначення залишкового ресурсу дизельного двигуна, з розробкою номограми та комп’ютерної програми індивідуального прогнозування;

– розробці шляхів технічної реалізації запропонованого методу на основі зразку приладу, в якому реалізовано цей метод.

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалена математична модель перекладки поршня в зазорі ЦПГ може бути використана для теоретичного визначення фазового показника виникнення віброударних посилань для інших рядних дизельних двигунів.

На основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень розроблено і впроваджено у виробництво методу діагностування ЦПГ в зарезонансній зоні ультразвукового діапазону, який відповідає структурним і функціональним особливостям більшості середньофорсованих дизельних двигунів складної лісогосподарської техніки.

РОЗДІЛ І
СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз сучасних методів діагностування

1.1.1. Класифікація методів технічного діагностування

Діагностування є складовою частиною ТО і ремонту тракторів та машин для лісотехнічних робіті направлено на зниження трудомісткості, підвищення якості цих робіт, а також збільшення ресурсу, підвищення безвідказності і покращення ефективності використання машин для лісотехнічних робіт [32].

За останні роки діагностування тракторів та машин для лісотехнічних робітпри технічному обслуговуванні набуло широкого розповсюдження. Розроблена технічна документація і діагностичні засоби, які дозволяють визначати технічний стан вузлів і агрегатів трактора при технічному обслуговуванню. Створені станції технічного обслуговування енергонасичених тракторів (СТОТ). На СТОТ є в наявності пост діагностування тракторів, до складу якого входить стенд з біговими барабанами КИ-8927 (КИ-8948) та комплект діагностичних засобів для СТОТ КИ-13920. Для СТОТ з програмою 400 і більше тракторів рекомендована діагностично-вимірювальна і прогнозуюча система КИ-13940.

Для пунктів технічного обслуговування (ПТО) сільськогосподарських підприємств створено стаціонарний діагностичний комплект КИ-13919, а для мобільного діагностування, окремий переносний комплект КИ-13901. Тобто з одного боку, використовуючи згадане вище діагностичне обладнання, можна визначити ресурс дизеля в умовах експлуатації і за результатами діагнозу своєчасно направляти його в ремонт. З другого боку, в зв’язку з недосконалістю окремих діагностичних засобів (чи їх малої кількості) і методів, які використовуються при ресурсному діагностуванні, а також низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, значна кількість двигунів ремонтується передчасно із значним недовикористаним ресурсом. Так, дослідження, проведені ГОСНИТИ, ЛСХИ, НАТИ та іншими організаціями, показали, що більше

половини тракторних дизельних двигунів направляються в ремонт з недовикористаним моторесурсом на 40 ...70% [11].

У зв'язку із недосконалістю методів та засобів ресурсного діагностування ЦПГ, обсяг та вид ремонту дизеля в теперішній час визначають з частковим його розбиранням (знімання головки блоку, під у картера, тощо), що мало допустимо для умов експлуатації.

Часто через нестачі засобів ресурсного діагностування, кваліфікованих майстрів-діагностів, дизелі направляють в ремонт без попередньої перевірки.

Результати досліджень, проведених ЧИМЕСГ держ. №209 з ПО "Россельхозтехника" показали, що до ремонтного фонду спеціалізованих ремонтних підприємств поступає близько 5% дизельних двигунів, у яких ЦПГ і КШМ не потребують ремонту зовсім (іноді такі двигуни вимагають заміни компресійних кілець). Виявлено також, що 30% дизелів потребують потокового ремонту [93].

Враховуючи те, що сучасні спеціалізовані ремонтні підприємства забезпечують відремонтованим дизельним двигунам підвищений ресурс (відновлений на 80%), передчасно вибраковуються дорогі і дефіцитні деталі КШМ приблизно у 35% дизелів, що призводить до значної перевитрати запасних частин.

За кор ом проблема визначення виду та обсягу ремонту двигунів є також вельми актуальною.

Так, у США передчасний ремонт двигунів обходиться щорічно в мільярд доларів, а для 28% двигунів спрацювання деталей КШМ не є основною причиною ремонту [13].

За дослідженнями Краузе В. [123] стосовно сільськогосподарської техніки кожен 15 двигун підлягає ремонту в результаті відсутності безрозбірних методів та засобів визначення технічного стану з'єднання "гільза циліндра-поршень".

Основними методами діагностування дизельних двигунів за класифікацією Аллілуєва В.О. є об'єктивні і суб'єктивні методи [3].

До суб'єктивних відносяться:

– *візуальні* (визначення місць підтікання рідини, кольору випускних газів);
– *на слух* (характер стуків, шумів, перебоїв в роботі двигуна, роботи центрифуги за параметрами “вибігу”);
– *за допомогою органів чуттів* (ступінь нагріву механізмів, визначення непрацюючої форсунки по відсутності імпульсів в паливопроводах);
– *програмні* (визначення неполадок за першочерговими і допоміжними симптомами).

Об’єктивні методи діагностування в свою чергу розрізняються:

– *за герметичністю робочих об’ємів* (витрата картерних газів, угар оливи, компресія, швидкість витікання повітря, тиск картерних газів та їх прорив у картер);
– *за параметрами робочих процесів* (димність, склад випускних газів);
– *за концентрацією продуктів зношення* (концентрація продуктів зношення в маслі. спектральний аналіз, провідність оливи);
– *за функціональними параметрами збірних одиниць* (продуктивність насосів, тиск відкриття клапанів, тиск впорскування палива, охолоджуюча здатність радіатора та ін.);
– *за структурними параметрами* (мікрометраж зазорів різних з’єднань, переміщення рухомої деталі в полі зазору за допомогою компресора);
– *за віброакустичними параметрами* (загальний рівень вібрації).

Аналіз літературних джерел останніх років показав, що метод діагностування за віброакустичними параметрами дещо вдосконалився. З’явилися нові методи діагностування ЦПГ:

– *за амплітудою удару на частоті фільтрації до 5 кГц* (Аллілуєв В.О, Ждановський А.В., Оксень Г.Д. та ін.) [11];
– *амплітуда і фаза удару на частоті резонансу віброперетворювача* (Соловьев В.И.) [98];
– *амплітуда удару на зарезонансній частоті віброперетворювача* (Метс Ю.А – діагностування паливної апаратури на частоті близько 1МГц) [98];

Однак ці нові методи також мають велику похибку вимірювання до 20% і розраховані на діагностування окремих марок дизельних енергетичних

установок. Тобто при переході на інший двигун (особливо багатоциліндровий) дані методи потребують додаткових випробовувань з метою визначення діагностичних параметрів. Наступним суттєвим недоліком є відсутність можливості визначення за отриманими параметрами залишкового ресурсу дизельного двигуна.

У зв'язку з цим нами пропонується удосконалити віброакустичний метод діагностування ЦПГ дизельних двигунів за параметром фази виникнення віброімпульса від перекладки поршня. При цьому пропонується для фільтрації використовувати зарезонансну частоту віброперетворювача, що дасть можливість підвищити відношення "сигнал–перешкода", а також спростить використання методу при переході до діагностування інших марок дизельних двигунів.

Таким чином загальна класифікація методів віброакустичного діагностування ЦПГ дизельного двигуна, із врахуванням вищесказаного, може мати вигляд наведений на рис.1.1.

1.1.2. Аналіз методів і засобів діагностування ЦПГ дизельних двигунів

Суттєвий внесок у розробку наукових і практичних основ, методів і засобів технічного діагностування сільськогосподарських машин внесли вчені ГОСНИТИ, НАТИ, СибИМЭ, Ленінградського, Іркутського, Саратовського, Челябінського, Пензенського сільгоспвузів та інших наукових установ. Особливо слід відмітити таких вчених як: Міхлін В.М., Ждановський Н.С., Бельских В.И., Аллілуєв В.А., Ніколаєнко А.В., Ульман И.А., Улитовский Б.А., Терських И.П., Скибневський К.Ю., Біргер И.А., Бухтіяров И.Д., Махоткін О.А., Гладков А.К., Керчер Б.М., Подщеколдін М.И., Оксень Г.Д., Соловйов В.И. та ін., які розробили методи та засоби ресурсного діагностування КШМ, та ЦПГ двигунів.

Деталі ЦПГ працюють в особливо складних умовах, у безпосередньому зіткненні з агресивним середовищем робочих газів, які утворюються при згоранні палива.

Технічний стан ЦПГ залежить від багатьох структурних параметрів наступних деталей: гільз циліндрів (спрацювання, зміна геометричної форми), кілець (спрацювання, поломка, втрата пружності, закоксовування), поршня

(спрацювання). Це значною мірою утруднює можливість визначення виду і обсягу ремонту дизеля. Стан ЦПГ, як правило, визначають безрозбірними методами, контролюючи діагностичні параметри.

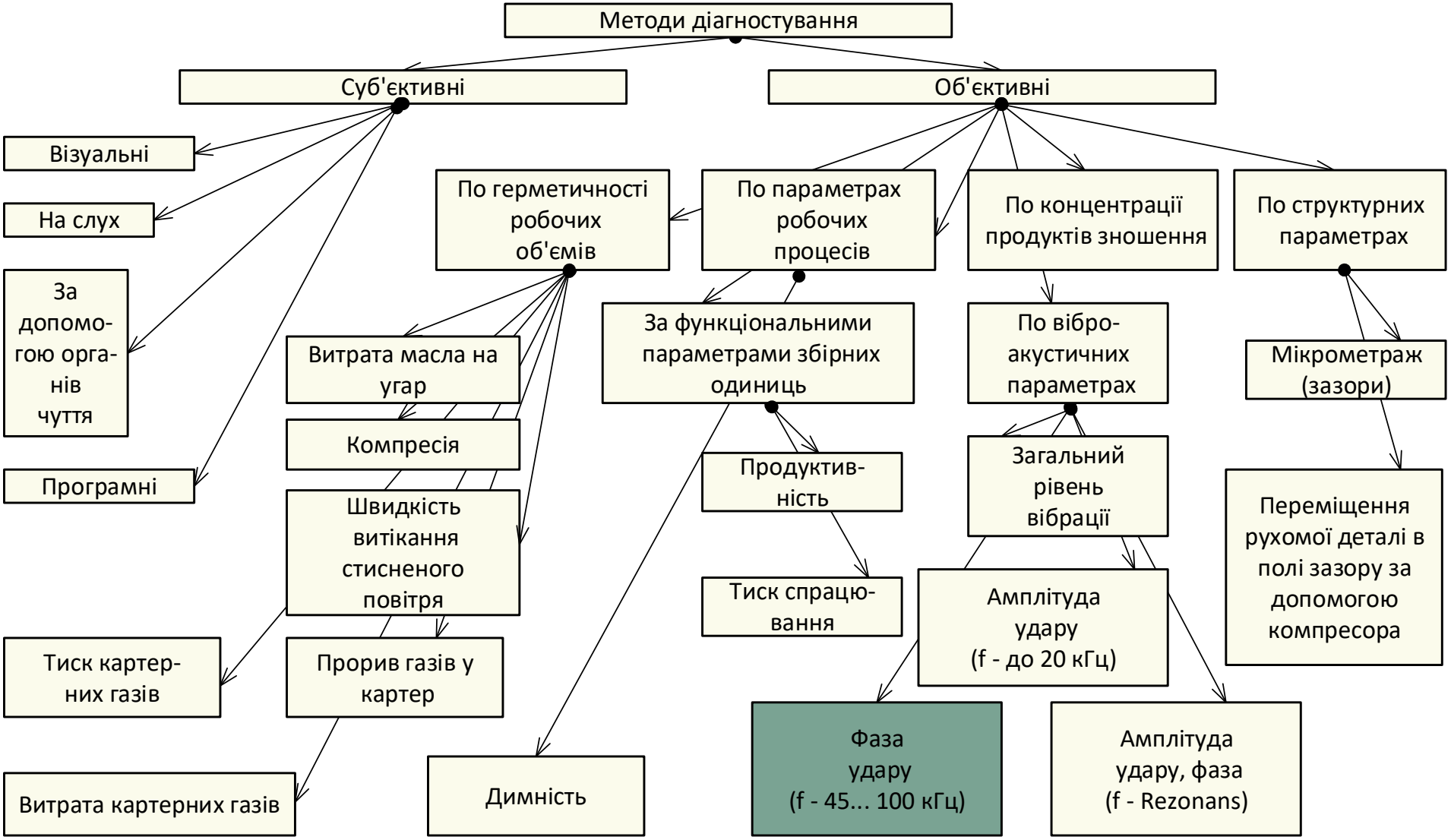


Рис 1.1. Класифікація методів і параметрів діагностування двигуна.

Основні, найбільш інформативні засоби перевірки технічного стану ЦПГ базуються на визначені кількості газів, які прориваються в картер, угару картерного оливи, герметичності надпоршневих об'ємів (за величиною компресії і розрідження), витратами повітря через нещільності, тиск картерних газів.

Найбільш прийнятним узагальненим параметром за думкою ряду дослідників є витрата картерних газів [11,12,26,46,72,73].

Однак рекомендовані для цієї мети газові лічильники мають суттєвий недолік – низьку точність, обумовлену втратами газів в атмосферу, через нещільності сальників колінчатого валу та з'єднань картеру під час виміру.

У ГОСНИТИ Дингою І.Г. розроблено спосіб визначення витрати картерних газів з примусовим відсмоктуванням їх із картера, за рахунок чого збільшується точність результатів вимірювання. Для цієї мети використовують диференційний рідинний манометр постійного перепаду тиску, при цьому картер двигуна з'єднується з атмосферою [26,46]. Однак вказаний метод не відповідає в повній мірі тим вимогам які пред'являються. Вимірювання необхідно проводити на працюючому двигуні, прогрітому до номінальної температури, а на результат вимірювання в значній мірі впливає випадкове розміщення поршневих кілець. Крім того даний метод не дозволяє визначити міру спрацювання гільз циліндрів.

Іншим інформативним показником, що характеризує технічний стан ЦПГ є угар оливи. Однак точне визначення угару оливи в експлуатаційних умовах викликає також суттєві ускладнення [8]. Це пояснюється тим, що загальна втрата оливи під час контролю складається безпосередньо з угару оливи, а також втрат оливи через нещільності ущільнень колінчатого валу і прокладки змащувальної системи двигуна. Крім того, величина втрати оливи на угар може коливатися в значному діапазоні в залежності від швидкісного, навантажувального і теплового режимів роботи двигуна під час контролю.

Відсутність загальноприйнятого експрес-методу визначення витрати оливи на угар утруднює його визначення в умовах експлуатації. Методи визначення угару оливи за допомогою ртутних і натрієвих індикаторів, а також

по оптичній густині відпрацьованого повітря з циліндра, при виключеній подачі палива, дальше лабораторних досліджень не пішли.

У роботі [73] Станіславський Л.В. розглянув аналітичне визначення технічного стану циліндро-поршневої групи за аналізом газів, які прориваються в картер. При цьому стан ЦПГ автор пропонує оцінювати за термогазодинамічними параметрам.

Недоліком цього способу є необхідність вимірювання при діагностуванні середньої температуру газів.

Нестеренко І.Ф. пропонує використовувати коефіцієнт надлишку повітря, як загальний критерій технічного стану ЦПГ дизеля, який визначають за складом випускних газів та параметрами постачання повітря [12].

Для вилучення впливу технічного стану паливної апаратури на коефіцієнт надлишку повітря автор рекомендує вимірювати геометричний кут початку нагнітання палива, що є суттєвим недоліком методу. Слід також відмітити важливість впливу температури навколишнього середовища на коефіцієнт надлишку повітря. Це призводить до необхідності внесення поправки при визначенні даного коефіцієнту з врахуванням умов навколишнього середовища.

Фірма “Бурмейстер і Вайн” (Данія) розробила оригінальну систему для діагностування дизелів. Ця система дозволяє безпосередньо вимірювати спрацювання гільз циліндрів з високою точністю (±2%) [79]. Для цієї мети на гільзі циліндра встановлюється плівковий резистор. По мірі спрацювання цього резистора змінюється його опір. Зміна опору є діагностичним параметром, за яким визначають спрацювання гільзи. Похибка вимірювання становить менше 1мкм. Але і цей спосіб не позбавлений недоліків, найсуттєвішим із них є дороговизна, пов’язана з встановленням резистора на кожну гільзу циліндра нового чи відремонтованого двигуна.

В Німеччині для діагностування поверхні гільз циліндрів і поршнів автомобільних двигунів, як відмічає Келер К. А., використовують один із способів інтроскопії – ендоскопію [67]. З цією метою використовують промисловий ендоскоп, що складається з тонкої трубки з оптичною системою і бінокулярного мікроскопа. Мініатюрна лампочка, розміщена на кінці трубки,

вставленої в свічковий отвір, освітлює поверхню, а зображення за допомогою оптичної системи передається в мікроскоп.

Даний спосіб придатний лише для якісної оцінки стану поверхні гільз і поршнів. Кількісна ж оцінка спрацювання деталей ЦПГ утруднена. Використання для цієї мети методу радіоактивних ізотопів, методу нейтронної активації в експлуатаційних умовах складно і дорого. Вони використовуються при дослідженнях циліндро-поршневої групи та інших з’єднань в лабораторних умовах [42].

Для експлуатаційного контролю процесу спрацювання з’єднань знаходить застосування спектрографічний метод. Цим методом (по аналізу картерної оливи) визначається момент підвищення спрацювання з’єднань вище допустимих значень. Таким чином, встановлюється необхідність ТО чи ремонту двигуна. Метод слід визнати перспективним для діагностування автотракторних двигунів [42].

По мірі спрацювання деталей ЦПГ або пригорання (закоксовування) поршневих кілець в канавках поршня знижується компресія(тиск в кінці такту стиснення). Компресія в значній мірі залежить від частоти обертання колінчатого валу. Її вимірюють при прокручуванні двигуна пусковим пристроєм, вимірюючи максимальний тиск, який розвиває циліндр, при цьому компресія спрацьованого двигуна на 30–35% нижча, чим у нового двигуна. На величину тиску у кінці такту стиснення в основному впливає не спрацювання гільз циліндрів, а герметичність клапанів. Отримані при діагностуванні дані є малодостовірними, так як компресія різко змінюється в залежності від частоти обертання колінчатого валу, а при використанні стартера неможливо дотриматись постійної частоти. Величина компресії також залежить від температури стінок циліндрів, а дотримування однакових умов при перевірці компресії кожного циліндра утруднено. Значна трудомісткість, низька точність визначення компресії утруднюють використання цього параметра для визначення технічного стану ЦПГ. Крім того цей спосіб не дозволяє встановити несправності конкретного з’єднання, яке впливає на герметичність камери згорання.

У даний час для визначення компресії використовують електронні компресиметри, принцип дії яких оснований на вимірюванні напруги на клемах стартера при прокручуванні колінчатого валу двигуна. Так, фірма «Mobil» розробила електронний компресиметр з реєстрацією зміни величини напруги за допомогою високочутливого вольтметра [41].

Відхилення напруги реєструються на робочому папері тестера у вигляді кривих ліній, по яких судять про компресію кожного циліндра. Розглянутий спосіб має ряд переваг в порівнянні з іншими методами визначення компресії: невисока трудомісткість контролю, записування результату діагностування, а також можливість визначення несправностей в колах живлення стартера і генератора. Однак способу притаманні і недоліки, властиві методу безпосереднього вимірювання компресії.

Більш досконалий спосіб оцінки стану кожного циліндра за величиною вакууметричного тиску, який створюється при прокручуванні колінчатого валу двигуна пусковим пристроєм, розроблено [12].

Вказаний спосіб менш трудомісткий і більш точний в порівнянні з способом визначення компресії.

Розрідження при прокручуванні колінчатого валу залежить від газопроникливих площин, які збільшуються при спрацюванні з’єднань ЦПГ, причому ці площини майже повністю ущільнюються моторним маслом внаслідок перепаду тиску між камерою згорання і простором картера.

Розроблено прилад К–69М для визначення технічного стану ЦПГ і клапанів на непрацюючому двигуні по витоку повітря з камери стиснення при закритих клапанах і надійним приляганням головки блоку циліндрів до блоку [66]. Камера згорання двигуна з’єднується з ємністю, в якій підтримується постійний тиск. Максимальний тиск, що відповідає повній герметичності, приймають за нуль, а повну витрату повітря з циліндра за 100%. При цьому рахують, що великим зазорам в з’єднанні “поршень-кільце циліндра” відповідає більший процент відносного витоку. Величину відносного витоку повітря перевіряють при положеннях поршня в н.м.т. і в.м.т. при закритих клапанах механізму газорозподілу. Стан гільз циліндрів пропонується оцінювати по

різниці витоку повітря в кінці і початку такту стиснення, стан поршневих кілець та клапанів по витоку повітря на початку такту стиснення.

Проте, як показує досвід використання приладу, одержані результати не завжди достатньо достовірні [66].

Використання пневматичного калібратора, аналогічного описаному вище для діагностування ЦПГ дизеля Д-54 було запропоновано ще в 1955р Лук'яновим І.Н.. Калібратор складався з двох камер, з'єднаних між собою каліброваним робочим отвором, друга камера сполучається за допомогою трубопроводу і вимірюваного отвору з отвором під форсунку. Як відмічає сам автор, на величину вимірюваного тиску суттєво впливає довжина трубопроводу, розміщеного між робочим і вимірюваним отвором. Щоб виключити вказаний вплив пропонується будувати тарований графік залежності вимірювального тиску від вимірювальної площини і визначати нещільності ЦПГ одним і тим же трубопроводом, не складеним в кільце [49].

Способи визначення технічного стану ЦПГ по витраті повітря, що подається під тиском в надпоршневий простір, мають істотний недолік. Вони не враховують пружність поршневих кілець, а також спрацювання поршневих канавок і кілець по висоті. При цьому спрацюванні кільця стисненим повітрям притискуються до нижнього торця канавки поршня і циліндра. Зусилля з яким притискується кільце до гільзи при діагностуванні ЦПГ прибором К-69М сягає, як показують розрахунки 0,15 МПа, що зрівнюється з питомим тиском нового кільця. Крім того, дослідження проведені в Німеччині на автомобільних дизелях марки 2КVД14, 5SPW - SRL показали на суттєвий вплив на витрату повітря взаємного розміщення замків поршневих кілець. Тому зміна витрати повітря перекриває діапазон зміни втрати повітря, зумовленої спрацюванням ЦПГ [123].

Науковцями розроблено спосіб діагностування ЦПГ кожного циліндра за величиною розрідження в циліндрі при непрацюючому двигуні, звільнений від недоліків, які притаманні методам діагностування ЦПГ стисненим повітрям. Для цієї мети запропоновано вакуумний калібратор, що складається з робочої і вимірювальної камери, зв'язаних між собою отвором і контрольним вимірювальним вакуумметром. Метод дозволяє оцінити стан компресійних

кілець за їх питомим тиском на стінку циліндрів і торцевий зазор між компресійними кільцями і канавками поршня. За діагностичний параметр приймається максимальна витрата повітря при середньому положенні кільця в канавці поршня.

У таблиці 1.1 наведено дані витрати повітря через кільцеві ущільнення для нормальної (I варіант) і спрацьованої ЦПГ (II варіант) у порівнянні з приладом К - 69. Для I варіанту питомий тиск верхнього кільця складав 0,25 МПа, для другого 0,1 МПа.

Таблиця 1.1

Втрати повітря через кільцеві ущільнення ЦПГ

Варіант	Діагностичний засіб	Кутове положення замків кілець, град.	Втрати повітря через зазори, %				Абсолютна величина загальної витрати, кг/с * 10^{-4}
			в замках кілець	в з'єднаннях з циліндром		в з'єднанні кільця з поршнем	
				зазо-ри	контактні поверхні		
Оцінка питомого тиску кілець							
I	К-69М	45	99,47	0	0,36	0,17	1,11596
		180	99,14	0	0,58	0,28	0,69596
	Вакуумний калібратор	45	90,24	9,55	0,14	0,07	0,37679
		180	85,05	14,59	0,22	0,10	0,24679
II	К-69М	45	92,03	3,85	2,80	1,05	1,91764
		180	88,45	5,77	4,20	1,58	1,27764
	Вакуумний калібратор	45	49,36	48,92	0,29	1,43	2,28946
		180	36,97	60,89	0,36	1,78	1,83946
Оцінка торцьових зазорів							
I	Вакуумний калібратор	45	15,84	0,85	0,14	83,17	1,76749
		180	12,76	1,24	0,11	85,89	2,89889

З аналізу таблиці випливає, що при подачі в циліндр стисненого повітря, незалежно від його стану спрацювання, витрата основної частини повітря

проходить через зазор у замку кільця. Чіткої залежності витрати повітря від спрацювання ЦПГ не спостерігається із-за випадкового положення замків компресійних кілець в канавках поршня.

Якщо в надпоршневому просторі створити вакуометричний тиск, то витрата повітря буде проходити в основному через зазори в з'єднанні кілець з гільзою (49...61%) і зазори в замках (37..49%). В цьому випадку вплив положення замків на витрату повітря знижується на 19% [66].

Недоліком розглянутого методу є те, що тіснота зв'язку діагностичного параметра з питомим тиском верхнього кільця суттєво залежить від герметичності клапанного механізму газорозподілу, в результаті якої суттєво знижується точність оцінки. У випадку порушення герметичності клапанів пропонується перекривати вікна в головці блоку, або використовувати спеціальну технологічну гідроплиту, яку встановлюють замість головки блоку [66,91,93]. Це суттєво збільшує трудомісткість діагностування.

Крім того, розглянутий метод не дозволяє однозначно визначити спрацювання гільз циліндрів із-за згаданих недоліків.

Використання для цієї мети вакуометричного тиску, який створюється в надпоршневому просторі камери згорання дизеля, певною мірою забезпечить підвищення точності і достовірності визначення технічного стану гільз циліндрів в порівнянні з відомими методами діагнозу ЦПГ.

Розроблено спосіб діагностування циліндро-поршневої групи автотракторних двигунів внутрішнього згорання по падінню швидкості розрідження в надпоршневому просторі. Він базується на створенні вакуометричного тиску в балоні, з'єднаним з отвором, в який встановлюється свічка запалювання, чи форсунка, при обертанні колінчатого валу, з'єднання балона з надпоршневим простором при положенні поршня в кінці такту стиснення і при фіксованій зміні тиску, за якою визначають загальний технічний стан циліндро-поршневої групи. Потім повторно створюють тиск в надпоршневому просторі при положенні поршня на початку такту стиснення, а спрацювання гільзи визначають за відношенням швидкостей зміни вакуометричного тиску для зазначених положень поршня при одному і тому ж значенні тиску [49].

Створення вакууметричного тиску в надпоршневому просторі циліндра, що діагностується, забезпечує однакове положення кілець в поршневих канавках при різних положеннях поршня і дозволяє виключити їх притискування до гільзи циліндрів.

Визначення технічного стану гільзи циліндра за відношенням швидкостей зміни вакууметричного тиску для обох положень поршня при одному й тому ж значенні тиску також забезпечує підвищення точності способу завдяки тому, що при однакових значеннях тиску в надпоршневому просторі умови втрати повітря через нещільності циліндра не обумовлені спрацюванням гільзи, однакові. Відповідно, відношення величин швидкостей зміни вакууметричного тиску для різних положень поршня при одному й тому ж значенні тиску залежить від величини спрацювання гільзи циліндра.

Випробування даного способу показали, що час падіння вакууметричного тиску в циліндрі не залежить від положення поршневих кілець в канавках поршня. Сили, які створюються вакууметричним тиском, недостатні для того, щоб поршневі кільця щільно прилягли до бокових стінок канавки. Про це свідчить і досвід використання приладу К-69М діагностами Естонії [3].

При цьому достовірний результат можна отримати тільки після створення в циліндрі тиску 4 кгс/см2, а не 1.6 кгс/см2, як передбачається за технологією діагностування [3].

У ході випробовувань макетного зразка встановити допустимі значення параметра складно, так як це потребує при випробуванні великої кількості двигунів різних марок і то тільки після мікрометражу цих двигунів. А цей етап дуже довгий і вимагає значних матеріальних ресурсів тощо.

1.1.3. Діагностування ЦПГ за віброакустичними параметрами

За останній час для визначення технічного стану окремих з’єднань механізмів двигуна внутрішнього згорання знаходить застосування віброакустична діагностика. Заслуговує уваги діагностування циліндро-поршневої групи за віброакустичними параметрами. Одним з цих параметрів є загальний рівень вібрації в дефектаційних зонах двигуна. Для діагностування механізмів за загальним рівнем вібрації необхідно знати середнє значення загального рівня для початкового і гранично спрацьованого стану.

Для вимірювання загального рівня вібрації в діагностичних зонах механізмів машин і прослуховуванню шумів використовують вимірювачі вібрації типу ПІУ-1М, шумоміри, а також прилади типу ЕМДП. Робота цих приладів базується на тому, що віброперетворювач, встановлений в дефектаційній зоні механізму перетворює коливання в електричний сигнал, який після підсилення подається на індикатор рівня вібрації.

Для технічного діагностування машин в умовах експлуатації необхідні малогабаритні переносні діагностичні прилади (електронні стетоскопи для діагностування машин за рівнем і частотним складом шуму тощо).

У Житомирській області добре себе зарекомендували малогабаритні діагностичні прилади типу ЕМДП-1 і ЕМДП-2, розроблені ДЕРЖНІТІ та інститутом «Електроніка». Ці прилади вимірюють, крім частоти обертання колінчатого валу, кута випередження подачі палива, та температури води, відносну величину загального рівня вібрації в дефектаційних зонах блоку двигуна. Похибка вимірювання сягає 20%.

При цьому механічні коливання за допомогою датчика перетворюються в електричний сигнал, який подається на вхідний каскад. Далі сигнал підсилюється в підсилювачах. Частина сигналу поступає на головні телефони і детектор, а далі з детектора на інтегратор та індикатор. Основним недоліком даного приладу є велика похибка у вимірах, так як за основний діагностичний параметр прийнято відносну величину загального рівня вібрації. Цей параметр, як показали дослідження є менш стабільним ніж фаза виникнення віброімпульсу.

За результатами досліджень вібраційних діагностичних параметрів в ультразвуковому діапазоні частот розроблено прилад діагностування дизеля ПДД для визначення наступних параметрів технічного стану 4-х циліндрових двигунів: кута випередження початку подачі палива, стан форсунок, теплових зазорів газорозподільчого механізму, зазорів в спряженні «поршень-гільза» циліндро-поршневої групи, частоти обертання колінчатого валу.

ПДД розрахований на експлуатацію в умовах пунктів технічного обслуговування підприємств, станцій технічного обслуговування тракторів, на ремонтних підприємствах тощо. Структурна схема його складається із 4-х

функціональних вузлів: каналів синхронізації, формування строб імпульсу, вимірювального каналу.

Канал синхронізації служить для формування імпульсу синхронізації з частотою, рівною частоті циклів роботи двигуна. Канал опори призначено для формування імпульсу, положення якого пов'язане з кутовим положенням колінчастого валу двигуна. Датчик, який використовується для формування опорної точки – індукційний, що значно збільшує похибку вимірювання.

Канал формування строб імпульсу служить для формування імпульсу фіксованої довжини і фази за кутом повороту колінчастого валу в циклі роботи двигуна незалежно від частоти його обертання. Довжина стробу відповідає параметрам таблиці 1.2.

Як видно з таблиці строб імпульс для кожного циліндру має фіксоване значення, яке лежить в межах від 20 до 50 град. п.к.в.

Вимірювання амплітуди віброімпульсу проходить по 100 реалізаціях. Потім із 100 вимірів вибирається той, в якого амплітуда набула найбільшого значення. Він і є діагностичним параметром.

Таблиця 1.2

Параметри регулювання стробуючого імпульсу приладу ПДД

Механізм (система)	Стробуючий імпульс, град. п.к.в.							
	1 циліндр		2 циліндр		3 циліндр		4 циліндр	
	Кутове положення стробу							
	початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець
Впускний клапан	560	610	390	425	35	55	215	235
Випускний клапан	350	390	180	200	530	570	0	20
ЦПГ	0	35	530	585	180	215	355	400
Паливна система	325	365	500	550	150	180	325	365

Аналіз методів діагностування ЦПГ, які використовуються в експлуатаційних умовах, показує на значну їх кількість. Однак розглянуті методи не можуть з достатньою достовірністю визначити вид і обсяг ремонту елементів ЦПГ із-за недоліків притаманних кожному методу. Це свідчить про

те, що розробка ефективних методів діагностування ЦПГ є актуальною задачею.

Таким чином найбільш ефективним є віброакустичний метод. Аналіз цього методу вказав на необхідність його вдосконалення. Якщо за діагностичний параметр прийняти фазу виникнення віброударних посилань, викликаних перекладкою поршня, то можна буде з високою точністю оцінювати технічний стан, в якому перебуває ЦПГ і за цим параметром визначати залишковий ресурс двигуна. Виділення ж для фільтрації зарезонансної зони ультразвукового діапазону частот, дозволить уникнути спектрального аналізу цих віброімпульсів, так як ультразвуковий діапазон менш чутливий до зміни зон резонансів каналу, при переході до іншої марки двигуна і відповідно в якійсь мірі забезпечить універсальність даного методу.

1.2. Характеристика відмов агрегатів і систем лісогосподарської техніки – 1500 та особливості роботи

Надійність технологічного процесу лісогосподарської техніки, його стабільність визначається тим, в якій мірі якість роботи останнього відповідає агротехнічним і експлуатаційним вимогам. При експлуатації машин для лісотехнічних робітможуть мати місце випадкові, поступові та експлуатаційні відмови, які і визначають головним чином надійність сільськогосподарських агрегатів [92].

За даними [92] експлуатаційні відмови складають у загальній кількості відмов близько 50%. При визначенні показників надійності машин для лісотехнічних робітвони зазвичай включаються в категорію випадкових відмов. Безвідмовність машин для лісотехнічних робітможна значно підвищити в першу чергу за рахунок скорочення експлуатаційних відмов, але для цього необхідно володіти інформацією про причини найбільш часто виникаючих відмов (табл.1.3). Більшість поступових відмов можуть бути попереджені при своєчасному кваліфікованому технічному і технологічному обслуговуванні.

Таблиця 1.3

Основні причини відмов лісогосподарської техніки

Причини відказу	Вид відказу		
	випадкові	експлуата-ційні	поступові
Попадання сторонніх предметів в робочі і транспортуючі органи комбайна	+	–	–
Забивання робочих і транспортуючих органів рослинною масою, намотування на них стебел і т.і.	+	+	–
Порушення регулювань і технологічних зазорів робочих органів	–	+	–
Поломка деталей із-за зношення поверхонь, що контактують, порушення режиму змащування та інших причин	–	+	+
Зношення ріжучих елементів робочих органів	–	+	+
Зношення спряжень в приводі робочих і транспортуючих органів	–	+	+
Порушення теплового режиму роботи двигуна із-за забивання рослинними рештками радіаторів, вентиляторів, тощо.	–	+	–
Очікування транспортних засобів	–	+	–

Для оцінки надійності і довговічності лісогосподарської техніки, його основних механізмів і систем, а також двигуна, використовують різного роду методи випробувань. Випробовування можуть бути повні, урізані і багаторазово урізані. Однак найбільшою об’єктивністю є отримання статистичних показників надійності та довговічності, які визначені в реальних умовах експлуатації.

Такі експлуатаційні випробовування проводилися нами в малому підприємстві “Агротехінформсервіс” протягом 4 років. Кількість об’єктів дослідження становила 8 лісогосподарської техніки машин для лісотехнічних робіт 1991р.випуску.

У результаті обробітку даних випробовувань були отримані усереднені по відношенню до сезону характеристики роботи цих лісогосподарської техніки за господарськими номерами (рис.1.2). При цьому фіксувалися такі параметри: вид відказу; простої по відказах, год; трудомісткість усунення відказу, л.-год.

Основними складовими витрат часу зміни при роботі лісогосподарської техніки були випадкові простої через відмови за технічними причинами, технологічними неполадками та очікуванням транспортних засобів для навантаження-розвантаження деревини. Сума всіх цих простоїв складає від 17% (МЕЗ №1) до 76 % (МЕЗ №2), при цьому простої пов'язані з очікуванням транспортних засобів складають близько 5,5% робочого часу.

Аналізуючи дані слід відмітити середні значення показників роботи машин для лісотехнічних робіт. Зокрема середній наробіток становив 222,5 м.-год., простої в середньому становили близько 100 год., а затрати на усунення відмов більше 150 год. Тобто в середньому близько 68% основної роботи водій-оператор займався усуненням відмов. Стосовно ж характеру відмов слід відмітити, що в перший рік близько 46% відмов були пов'язані із приробітком деталей та неякісним їх виготовленням і тільки на 4-й рік з'явилися відмови, причиною яких було зношення робочих поверхонь.

Аналіз показників надійності лісогосподарської техніки проводився за їх агрегатами і системами (табл.1.4). Комплексну (багатокритеріальну) оцінку технічної системи - 1500А здійснювали при системному підході із застосовуванням для оцінки трьох критеріїв: час простоїв; кількість відмов; трудомісткість усунення відмов (рис.1.3). Найбільша кількість відмов припадає на ходову частину машин для лісотехнічних робіт. Ці відмови в основному пов'язані із забиванням робочих органів і відповідно із виходом їх з ладу. Друге місце посідають відмови гідравлічних систем лісових МЕЗ. В основному це близько 80% – основна гідросистема, близько 12% гідростатична трансмісія і 8% – гідросистема рульового керування. Однак, не дивлячись на велику кількість відмов, ці відмови при високій кваліфікації обслуговуючого персоналу легко усуваються і тому трудомісткість усунення їх незначна, в порівнянні з

Таблиця 1.4

Показники багатокритеріального аналізу надійності агрегатів і систем машин для лісотехнічних робіт

Назва агрегату чи системи машин для лісотехнічних робіт	Показники систем (критерії)			Ранжування систем							
	Простої, год. **(K_1)**	Кількість відмов, шт. **(K_2)**	Трудомісткість усунення, люд.год. **(K_3)**	За рангом	За відстанню до цілі						
					$K_1=K_2=K_3$	**$K_1>K_2>K_3$**	**$K_1=K_2>K_3$**	**$K_1>K_2=K_3$**	**$K_1<K_2<K_3$**	**$K_1<K_2=K_3$**	**$K_1=K_2<K_3$**
Паси	191	17	338	6	13.3	14	12.8	14.6	13.2	12.2	14
Ходова	105	8	43	3	4.31	5.5	4.85	5.43	3.75	3.86	3.77
Гідравліка	48	22	75	2	3.93	4.08	4.1	4.0	3.25	3.19	3.75
Двигун	254	17	428	7	17.3	18.3	16.6	19.1	16.9	15.6	18.1
Електроніка	9	4	19	1	0	0	0	0	0	0	0
Ідеалізований варіант	9	4	19	–	0	0	0	0	0	0	0
Всього	**808**	**116**	**1223**	–	–	–	–	–	–	–	–

трудомісткістю усунення відмов двигуна електричної установки. Хоча кількість відмов двигуна порівнюючи з іншими системами не дуже висока однак наслідки таких відмов дуже суттєві. Середні простої по причині відказу двигунів становили – 254 год., а трудомісткість усунення – 428 люд.год.

Для оцінки надійності машини для лісотехнічних робіт використовували метод відстані до цілі порівнюючи кожну із систем із ідеалізованим варіантом. Аналіз даних табл.1.4 показав, що найбільш надійною системою машини для лісотехнічних робіт є електроніка, а найменш надійним –двигун. Вартість останнього в структурі вартості машини для лісотехнічних робіт становить 12,5%.

Проведений аналіз роботи машин для лісотехнічних робіт показав, що найменш надійним агрегатом машини для лісотехнічних робіт є двигун. Це в першу чергу має бути легкий швидкохідний дизель, який за своєю вагою і габаритними розмірами придатний для встановлення на машини для лісотехнічних робіт. Спроба створити універсальний дизель багатоцільового призначення, який міг би використовуватись і на тракторах, і на лісових МЕЗах, завершилась невдачею.

В сучасних машинах для лісотехнічних робіт пропускна здатність ходової частини збільшена до 11 кг/с, що потребує додаткової потужності дизеля. Тому сучасну головну технічну концепцію вимог до двигунів можна сформулювати наступним чином:

Підвищення потужності двигуна при незмінних габаритних розмірах можливе підвищенням форсованості цих двигунів. Враховуючи незначне річне завантаження (не більше 300 м.-год./рік) на машини сезонного використання встановлюються високо-форсовані двигуни (турбонадув+ охолодження).

По форсованості двигуни поділяються на:

- низькофорсовані (питома потужність до 8 кВт/л);
- средньофорсовані (8-12 кВт/л);
- високофорсовані (від 12 кВт/л і вище) [17, 20].

Для прикладу енергетична установка №1 має питому потужність 17.05кВт/л, а енергетична установка – 19.2, що свідчить про високу, на момент запуску у виробництво, форсованість дизеля. При встановленні такого типу

двигунів на трактор, для підвищення ресурсу його деформують, шляхом зняття охолодження та зниження тиску надуву.

Форсування дизеля енергетичної установки дозволило за рахунок надуву підвищити потужність на 30%, а за рахунок охолодження додатково 20%. Це з одного боку. З іншого, це призвело до розширення швидкісного і навантажувальних режимів роботи і, як наслідок, до підвищення теплових напружень деталей. При цьому зросли температура і максимальний тиск робочого циклу, підвищились швидкості спрацювання деталей, особливо ЦПГ.

Робота двигуна лісогосподарської техніки пов'язана з частими і різкими змінами режимів роботи. Тобто крутний момент і частота обертання колінчатого валу безперервно змінюється. Можна стверджувати, що двигун лісогосподарської техніки працює в тяжких умовах. Кількість включень основних механізмів машини і кількість пусків велика. Робота цих двигунів під навантаженням становить 60-75% загального часу експлуатації. Для двигуна лісового МЕЗа характерні режими роботи, при яких перехідні процеси збільшення ("наброс") та зменшення ("сброс") навантаження змінюються так часто, що перехідні процеси не встигають завершитися. Тобто двигун працює на несталому режимі роботи.

В зв'язку з відмінністю режимів роботи двигуна машини для лісотехнічних робіт мають місце і конструктивні особливості цих енергетичних установок. Зокрема:

- з метою вдосконалення процесу сумішоутворення впускні канали енергетичних установок в головці циліндрів виконані у вигляді гвинтових каналів, які створюють обертальний рух повітряної суміші навколо осі циліндра;
- для зменшення впливу фактору відбору потужності від двигуна на два боки на енергетичній установці використовується конструкція шківа що усуває вплив згинаючого моменту (від зусилля натягу ремнів ходової частини) на передній носок колінчатого валу;
- дизелі лісогосподарської техніки (із-за високого форсажу) комплектуються гартованими циліндрами, які забезпечують високу зносостійкість поршневих кілець в умовах абразивного зношування при роботі двигуна на підвищених теплових і навантажувальних режимах.

– для зниження впливу підвищеного теплового режиму на клапанний механізм, енергичних установок клапани мають додаткову наплавку на посадочному пояску сплаву ЕП-616, що підвищує їх зносостійкість;
– за рекомендаціями вчених, при наявності в забрудненому повітрі, яке поступає в камеру згорання двигуна великої кількості стружки і пилку рослин на дизелі встановлюються передочисник повітря типу “обертовий повітрозбірник”, що має місце на електричній установці;
– енергетичні установки мають підвищений ступінь надуву, вищу температуру газів на вході в турбіну і як результат на виході, та частоту обертання турбіни. Це призвело до необхідності додаткового охолодження надувочного повітря, завдяки якому кількість його збільшується, що сприяє більш повному згоранню палива, кращому протіканню робочого процесу;
– велика забрудненість олив, викликана підвищеним зношенням деталей ЦПГ та КШМ, підтверджується встановленням на енергетичну установку замість повно-поточної центрифуги повно-поточних фільтрів. Однак з одного боку це покращило фільтрацію частинок органічного походження, а з іншого боку погіршило очищення оливи від домішок неорганічного походження, що властиве очищенню центрифугою, так як ці домішки викликають найбільший знос деталей двигуна. Перепускання основного потоку оливи через фільтруючі елементи викликало зміни в конструкції системи охолодження двигуна. Замість оливного радіатора на двигуні встановлено водооливний теплообмінник, який в умовах рядової експлуатації (в особливості на комбайнах з подрібнювачами, які потребують додатково до 30кВт потужності) не справляється зі своєю функцією, що призвело до більш напруженого теплового режиму. В тракторних дизелів температура не перевищує 90°С тоді як Харвестера (Форвардера) – 100°С;
– наявність трьох ступенів очищення повітря в енергетичній установці свідчить про велику, в порівнянні з тракторними двигунами, забрудненість повітря;

Зазначені вище конструктивні і експлуатаційні особливості експлуатації дизеля лісогосподарської техніки та малий термін амортизації відносить його в окрему групу, тому подальше дослідження направлене на підвищення його надійності (безвідмовності), шляхом удосконалення методу діагностування, для

вчасного попередження можливих відмов та прогнозування на основі нових параметрів залишкового ресурсу.

1.3. Аналіз зношення циліндро-поршневої групи дизельних двигунів

Міжремонтні строки практично для всіх типів дизелів в більшості випадків визначаються інтенсивністю спрацювання деталей циліндро-поршневої групи, яка находиться в найбільш важких умовах роботи, точніше, верхнього поясу гільзи циліндра, компресійних кілець і канавок під кільця в головці поршня.

У загальному випадку інтенсивність зношення деталей ЦПГ визначається впливом великої кількості самих різноманітних факторів: конструктивні, технологічні особливості їх виготовлення, матеріалами і умовами змащування поверхонь тертя, типом палива і олив, характером прикладення і значенням силових навантажень, відносною швидкістю і рівномірністю руху сполучених елементів, температурним станом тертьових поверхонь тощо [61].

Для визначення швидкості зношення деталей ЦПГ у відповідних умовах експлуатації необхідно отримати залежність показника зношення (u) (наприклад: зміна зазору) від часу (t). Дана швидкість зношення характеризується тангенсом кута нахилу прямої зношення($tg\alpha$).

Розглянемо характер і ступінь впливу окремих факторів на інтенсивність зношення ЦПГ дизельних двигунів.

По мірі завантаження двигуна інтенсивність зношення деталей ЦПГ зростає. Найбільше зношення спостерігається в верхньому поясі гільзи. В цьому місці, як правило, проходить тертя компресійних кілець об дзеркало циліндра в умовах граничного змащування. При порівняно малих змінах значеннях тиску

газів p (від 2 до 8 МПа) (рис 1.4, а) інтенсивність зношення збільшується

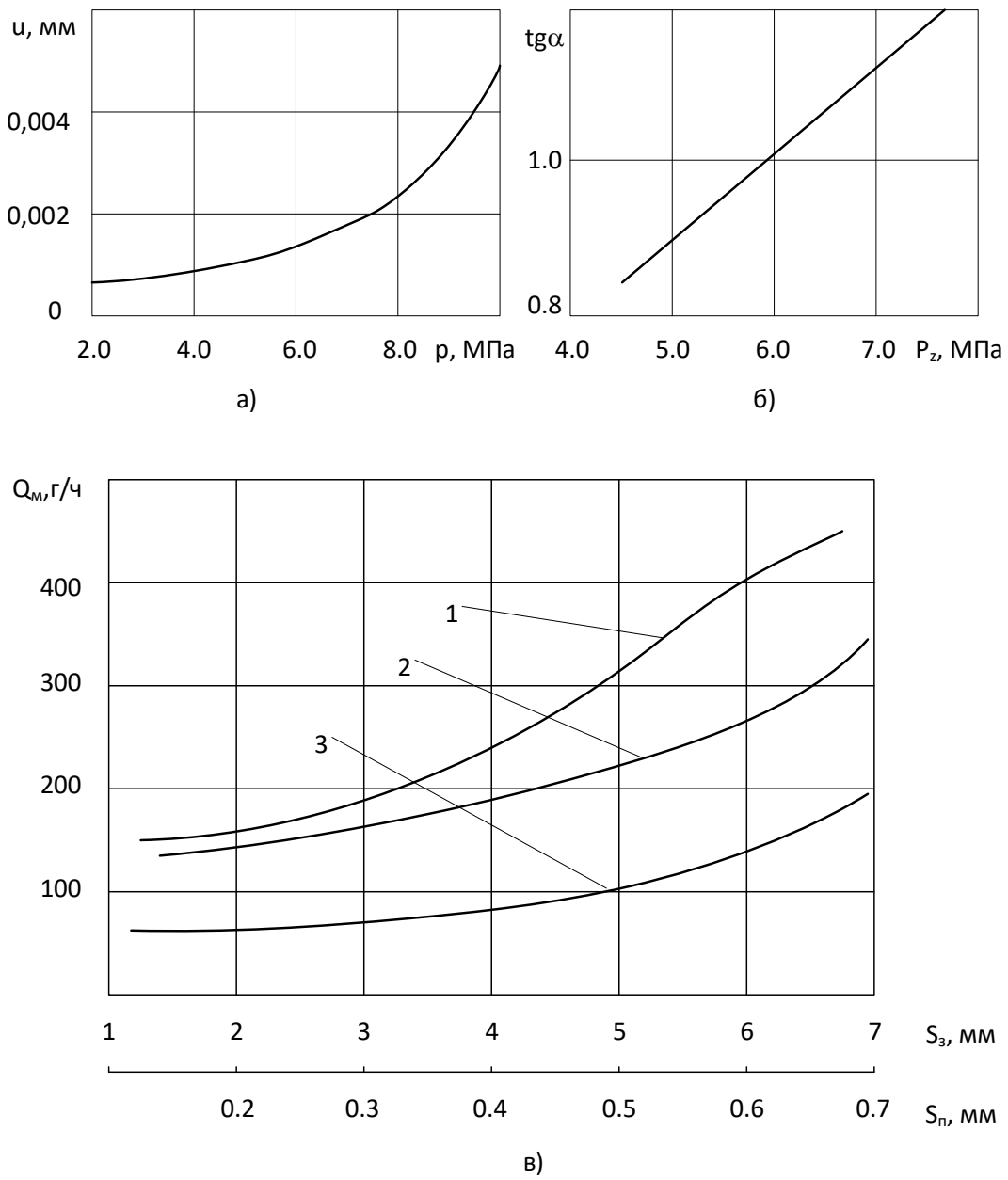


Рис.1.4. Залежності: зношення гільзи при граничному змащуванні від тиску (а);
швидкості зношення від максимального тиску (б);
витрати картерного масла $Q_м$ від зазору (в) для двигуна Д-54:
1- між канавкою поршня і першим поршневим кільцем;
2- в замку поршневого кільця;
3- між поршнем і гільзою

відносно незначно (на 50-60%), при цьому характер залежності близький до лінійної [61]. Подальше підвищення P до 10 Мпа, що відповідає тиску двигуна СМД-31А призводить до різкого збільшення u (в 3.5 рази), що пояснюється умовами граничного змащення спряжень і абразивного зношення. Це вказує на те, що тиск при терті є одним з головних факторів, які визначають зношення.

На інтенсивність зношення деталей ЦПГ значно впливає максимальний тиск Pz (рис.1.4 б). Зростання Pz на 67% в даному випадку привело до збільшення швидкості зношення кілець на 35-40%.

З підвищенням навантаження при роботі двигуна в значній мірі підвищуються газові навантаження на пари тертя ЦПГ, температура поверхонь тертя, змінюються умови змащування (температура оливи, зазори за рахунок деформації деталей під дією зростаючих теплових і газових навантажень. Все це призводить до інтенсифікації зношення деталей.

В процесі експлуатації дизеля за рахунок зношення деталей циліндро-поршневої групи спостерігається зниження тиску в кінці такту стиснення з 3,5-4,5 до 2,8-3,1 МПа [8], що призводить до погіршення процесу згорання і збільшення втрат тепла через стінки камери згорання з відпрацьованими газами.

Економічність сучасного дизельного двигуна оцінюється не тільки витратою палива, а й втратою моторної оливи, вартість якої майже в 6 раз вища вартості палива.

Підвищена втрата олив викликає перекачування його маслоз’ємними кільцями з канавками, перекритими вуглеводними відкладеннями. Такі кільця перетворюються в компресійні і припиняють зняття залишків оливи із стінок циліндра, при цьому в камеру згорання попадає більша кількість оливи.

Зношення циліндрів, канавок поршня, кілець по висоті і діаметру призводить до збільшення зазорів, через які перекачується олива в камеру згорання.

Найбільш суттєво на витрату оливи впливає зношення поршневих канавок і кілець по висоті (крива 1), а менш суттєво (крива 3) – зазор між циліндром і поршнем (рис.1.4. в) [8].

Перевитрата оливи призводить до утворення нагару на поршнях і камерах згорання, погіршенню тепловіддачі, утворенню абразивної грязі і в решті решт підсиленню зношення ЦПГ.

На швидкість зношення деталей циліндро-поршневої групи суттєво впливає відхилення основних регулювань паливної апаратури від номінальних установочних значень (рис.1.5).

Дослідженнями Ждановського Н.С. були встановлені залежності зношення циліндра енергетичної установки від параметрів регулювань паливної апаратури. Моделювання зношення проводилося при наступних порушеннях регулювань: 1 – збільшено кут випередження початку подачі палива на 21%; 2 – зменшено кут випередження початку подачі палива на 29%; 3 – завищена циклова подача палива на 22,5%; 4 – понижений тиск впорскування форсунки на 40%; 5 – комплексне порушення регулювань (збільшено кут випередження початку подачі палива на 21%, завищена циклова подача палива на 22,5%, понижений тиск впорскування форсунки на 40%); 6 – комплексне порушення регулювань (зменшено кут випередження початку подачі палива на 29%, завищена циклова подача палива на 22,5%, понижений тиск впорскування форсунки на 40%) [42].

Як видно з рис.1.5, що всі варіанти порушення паливної апаратури викликають форсоване зношення деталей ЦПГ. Найбільший вплив здійснює комплексне порушення регулювань, яке є основним в умовах експлуатації.

Іншим фактором, який суттєво впливає на інтенсивність зношення пар тертя ЦПГ є відносна швидкість їх руху. Навіть при малих навантаженнях зміна швидкісних режимів призводить до підвищення інтенсивності зношення [61].

Таким чином, робота двигунів на змінних режимах супроводжується суттєвою інтенсифікацією зношення, що значною мірою відноситись і до енергетичних установок, які працюють в режимі нерівномірного навантаження. Їх коротка технічна характеристика наведена в таблиці 1.5.

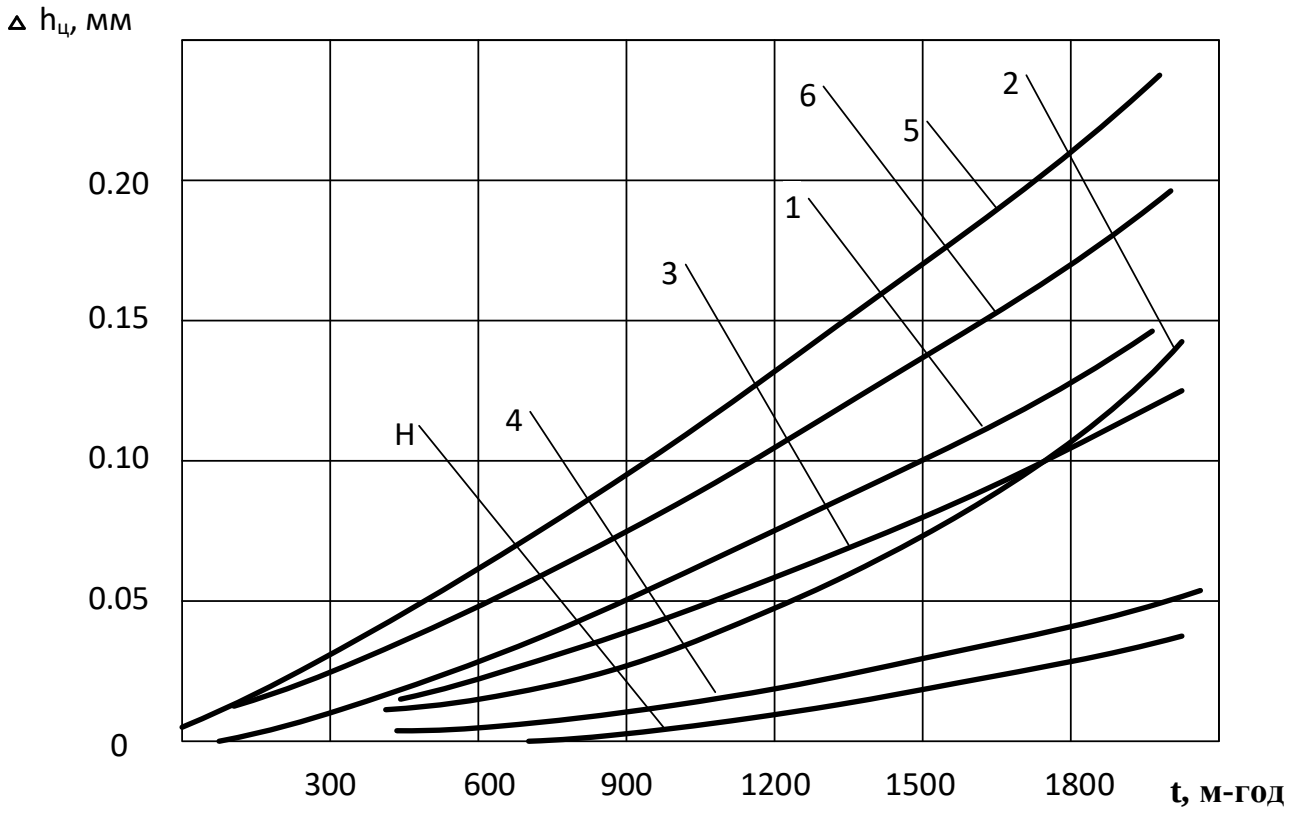


Рис.1.5. Зміна зношування верхньої зони циліндруΔ $h_ц$ від наробітку двигуна Д-50 при різних параметрах регулювання паливної апаратури в умовах експлуатації:
1- збільшено кут подачі палива на 21%;
2- зменшено кут подачі палива на 29%;
3- завищена циклова подача палива на 22.5%;
4- понижений тиск форсунки на 40%;
5- компленксне порушення регулювань (1, 3 та 4);
6- компленксне порушення регулювань (2, 3 та 4);
Н- норма.

Таблиця 1.5

Технічна характеристика енергетичної установки

Найменування показників	Значення
Експлуатаційна потужність, кВт	162.0
Номінальна частота обертання колінчастого валу, $хв^{-1}$	2000
Число циліндрів, шт	6
Робочий об’єм циліндрів, л	9.5
Питома витрата палива на режимі експлуатаційної потужності, г/кВт	245
Діаметр циліндра (номінальний), мм	120
Хід поршня, мм	140
Втрата моторної оливи на угар від витрати палива, %	0.5
Тиск надуву на режимі експлуатаційної потужності, МПа	0.095...0.115

Ресурс двигуна до першого капітального ремонту залежить від якості обслуговування. Наприклад при “рядовій” експлуатації цей ресурс на 25-30% менше, ніж при експлуатації в нормальних умовах і якісному технічному обслуговуванню [46].

Форсоване зношення двигуна, особливо компресійних кілець, можна пояснити попаданням в циліндри великої кількості пилу із-за несправностей повітроочисника і підсмоктування не відфільтрованого повітря через ущільнення впускного тракту. Граничне спрацювання деталей ЦПГ супроводжується погіршенням пускових якостей двигуна, нестійкій роботі його на малій частоті обертання колінчастого валу, підвищеним проривом газів у картер, підвищеною втратою олив і прискореним її старінням, ростом токсичності продуктів згорання, підвищеною витратою палива та зниженням потужності. При досягненні граничних спрацювань і їх перевищенні спостерігається форсоване зношення деталей і є небезпека виникнення аварійних ситуацій.

Аналіз розглянутих факторів, які впливають на інтенсивність зношення деталей ЦПГ дозволив виявити основні шляхи підвищення її довговічності. Зокрема таке підвищення можливе за умови правильної регламентації операцій технічного обслуговування, з вилученням передчасного розбирання механізмів, основану на безрозбірній діагностиці, розробку і удосконалення методів і

засобів безрозбірного діагностування всіх вузлів і механізмів двигуна. Розробка таких методів дозволить правильно визначити технічний стан, в якому перебуває об’єкт, і на базі даного діагнозу спрогнозувати залишковий ресурс.

1.4. Висновки і постановка задач дослідження.

Одним із найважливіших напрямків науково-технічного прогресу в області експлуатації та обслуговування машин і їх агрегатів є діагностування і прогнозування залишкового ресурсу.

Підвищення надійності і довговічності дизельних енергетичних установок лісогосподарської техніки - 1500 можливе при умові розробки ефективного методу діагностування циліндро-поршневої групи і за результатами якого визначення з достатньою точністю залишкового ресурсу.

Розробка методу діагностування ЦПГ повинна базуватися на фазових параметрах виявлення віброакустичного посилання при перекладці поршня в зазорі.

На основі викладеного огляду і висновків сформульована наступна мета дослідження – підвищення надійності двигуна шляхом удосконалення методу діагностування ЦПГ за параметрами ударних імпульсів, виділених в за резонансній зоні ультразвукового діапазону (на прикладі дизельного двигуна лісогосподарської техніки) з урахуванням особливостей, режимів і умов експлуатації.

Досягнення поставленої мети дослідження можливе при вирішенні таких задач:

Проведення розрахунково-теоретичного аналізу виникнення віброакустичних посилань в ЦПГ стосовно подальшого їх використання для діагностування даного з’єднання.

Теоретично обґрунтувати умови оптимальної фільтрації вібраційного процесу з метою здійснення надійної селекції віброакустичних посилань, виявлення джерела в циклі роботи двигуна і визначення їх положення на часовому інтервалі.

Обґрунтувати метод прийняття рішення про технічний стан ЦПГ.

Розробити математичну модель визначення залишкового ресурсу дизельного двигуна.

Експериментально підтвердити розробку теоретичних положень і виявити параметри віброударних посилань, які однозначно характеризували б технічний стан ЦПГ дизельного двигуна. Дати оцінку вибору діагностичних параметрів.

Розглянути шляхи можливої технічної реалізації запропонованого методу.

РОЗДІЛ ІІ
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІБРОАКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ

2.1. Математична модель виникнення віброударного імпульсу в циліндро-поршневій групі

Оптимальне вирішення завдань віброакустичного діагностування дизельних двигунів, може бути отримане тільки в результаті аналізу множини W станів, у яких вони можуть перебувати в період експлуатації. В числі деталей, стан яких визначає необхідність відправлення двигуна в капітальний ремонт, значне місце 63% [111] посідає циліндро-поршнева група (ЦПГ). Безрозбірне визначення зазору в з’єднанні “поршень-гільза” є одним з найбільш важливих завдань при діагностуванні двигуна.

Раціональний вибір діагностичних ознак, тобто характеру коливальних процесів, які супроводжують роботу двигуна, в значній мірі визначає вирішення задач віброакустичного діагностування.

Побудова алгоритмів розпізнавання технічного стану в діагностиці суттєво спрощується завдяки побудові математичної моделі, яка б описувала зв’язок між множиною діагностичних ознак. При цьому не має суттєвого значення, у якій формі подано цей зв’язок.

Характер виникнення коливальних процесів у ДВЗ своєрідний. Відмінною особливістю його є імпульсний характер збудження, викликаний великою швидкістю наростання тиску в камері згорання, ударами при перекладці поршнів в зазорах, процесами впорскування палива та випуском відпрацьованих газів.

Наявність зазору ЦПГ (рис.2.1), а також діючі на поршень періодично змінні навантаження обумовлюють бокові переміщення поршня, які супроводжуються ударами останнього об гільзу. Дана властивість може бути використана при побудові математичної моделі радіального руху поршня і, як наслідок визначення технічного стану з’єднання.

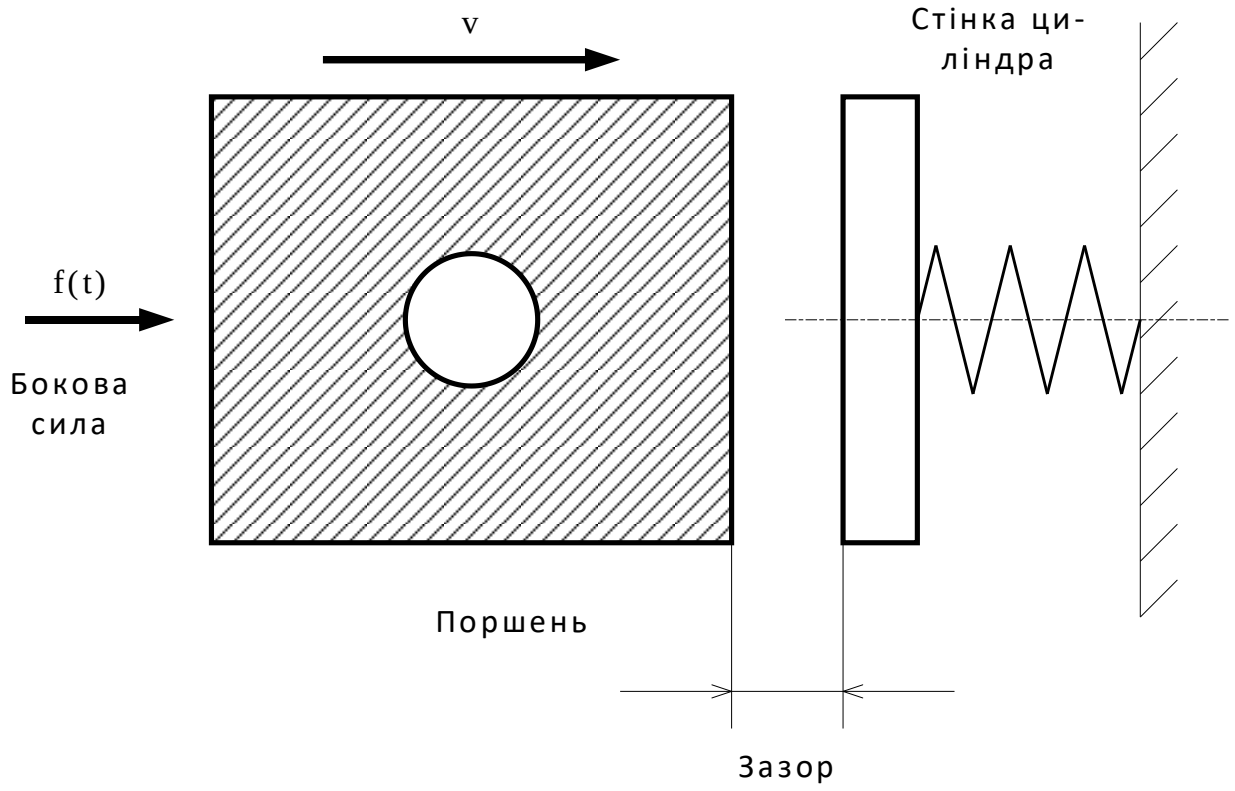


Рис.2.1. Схематичне зображення моделі виникнення віброударного посилання в циліндро поршневій групі.

2.1.1. Динаміка двигуна та формування вібрації в зоні циліндрів

В працюючому двигуні розрізняють три види фізичних процесів: рух його деталей; взаємний обмін енергією з навколишнім середовищем; спрацювання деталей. Діагностування має відношення до всіх цих процесів. Спрацювання деталей змінює стан механізму, визначення якого і складає задачу діагностування. Процеси взаємодії механізму з навколишнім середовищем можна вважати діагностичним сигналом. І, як наслідок, завдяки руху механізму встановлюється зв’язок між станом його деталей і діагностичним сигналом.

У силу кінематики роботи повзунів, в поршневій групі дизельних двигунів відбувається перекладка поршня з одного боку гільзи на інший (рис.2.1). Наявність зазору між поршнем і направляючою циліндра підсилює це явище. Перекладка проходить при зміні напряму рівнодіючої бокової сили N. Закономірності радіального руху поршня в циліндрі розглядалися в роботах

[3,19,28]. Найбільш інтенсивний удар поршня об гільзу виникає поблизу верхньої мертвої точки на такті розширення, так як величина сили N (рис.2.2) має тут найбільше значення. Удар в цьому випадку направлений у бік, протилежний обертанню колінчастого валу.

Величина бокової сили N, може бути визначена за виразом [3]:

$$N = \left(P_г \pm P_j\right) \cdot tg\beta, \qquad (2.1)$$

де $P_г$ – сила тиску газів на поршень, діюча по осі циліндра;

P_j – сила інерції мас, що рухаються поступально;

β – кут нахилу шатуна.

Силу газів можна визначити користуючись залежністю:

$$P_г = (p_г - p_0) \cdot F_n, \qquad (2.2)$$

де $p_г$ –тиск газів в циліндрі визначений за індикаторною діаграмою;

p_0 – тиск у картері двигуна. (приймається рівним тиску навколишнього середовища);

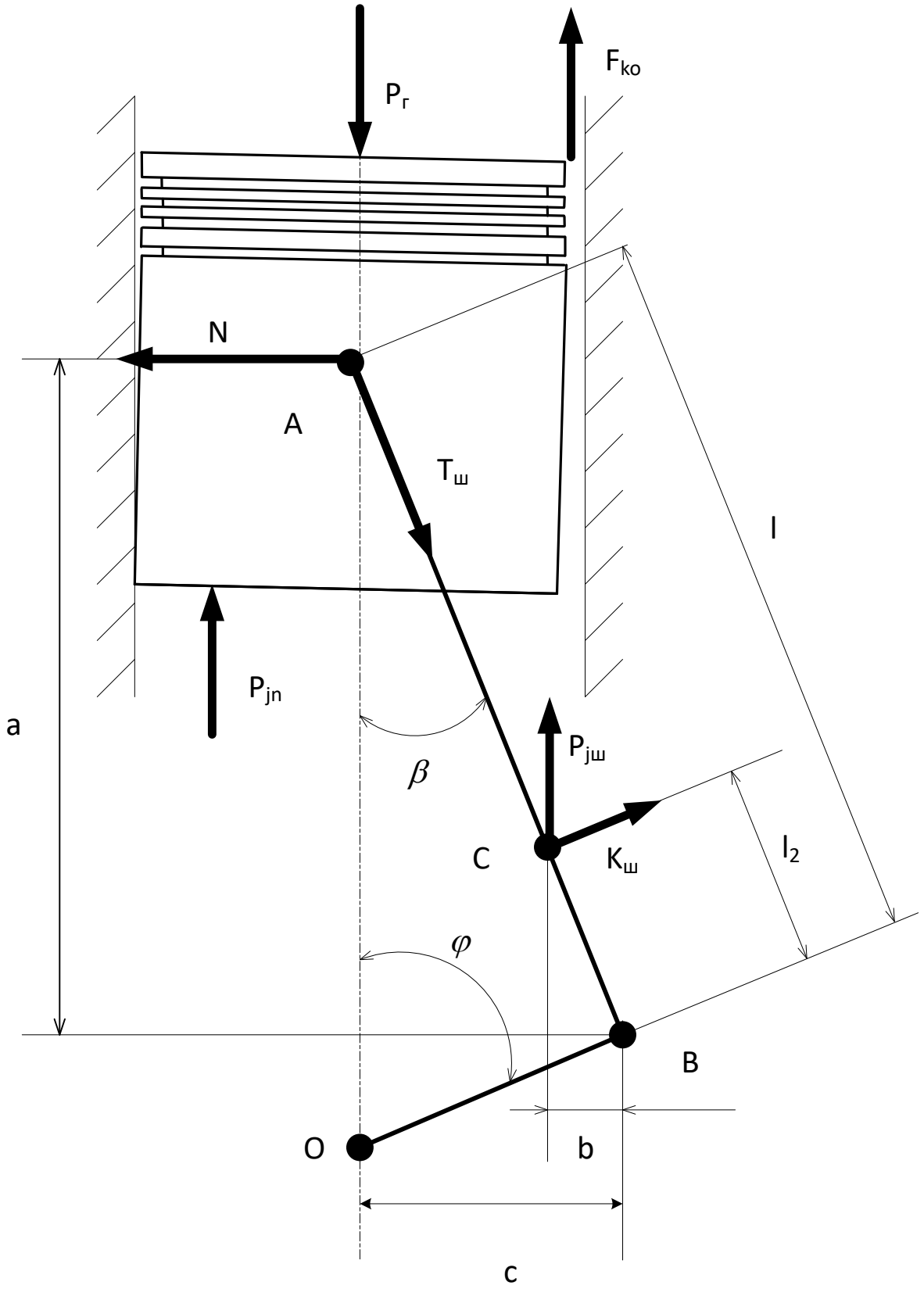


Рис 2.2. Розрахункова схема сил, які діють на кривошипно-шатунний механізм.

F_n – площа поршня.

Однак залежність (2.1) не в повній мірі враховує всі складові результуючої сили. Зокрема потребує уточненого врахування сила інерції шатуна, яка впливає на закономірності перекладки в зазорі між поршнем і гільзою.

За характером руху мас, деталі кривошипно–шатунного механізму можна розділити на:

- масу, яка рухається зворотно-поступально (поршнева група і верхня головка шатуна);
- масу, яка здійснює обертальний рух (колінчастий вал і нижня головка шатуна);
- масу, яка здійснює складний плоско–паралельний рух (стержень шатуна) [16].

Для визначення результуючої сили N розглянемо шатун (рис.2.2) як систему трьох матеріальних точок з масами m_1, m_2, m_3 [90].

Побудова математичної моделі системи, що динамічно відповідає дійсності, вимагає дотримання наступних вимог:

- сума всіх приведених мас повинна дорівнювати масі реального шатуна;
- загальний центр ваги всіх мас, що заміняють реальний шатун, повинен співпадати з центром ваги шатуна і рухатись за законом руху цього центру;
- сума моментів інерції всіх мас відносно осі, що проходить через центр ваги шатуна, повинна бути рівною моменту інерції маси шатуна I_c відносно тієї ж осі;
- кутове прискорення приведеної системи в обертальному русі по відношенню до її центра ваги, повинна дорівнювати кутовому прискоренню шатуна при тому ж русі.

Повністю умови приведення, необхідні для отримання математичної моделі системи, рівнозначній в динамічному відношення системі шатуна, будуть мати наступний вигляд:

$$\left| \begin{array}{l} m_ш = \dfrac{G_ш}{g} = m_1 + m_2 + m_3; \\ m_1 \cdot l_1 = m_2 \cdot (l - l_1); \\ J_c = m_1 \cdot l_1^2 + m_2 \cdot (l - l_1)^2; \end{array} \right. \qquad (2.3)$$

Четверта умова також виконується так, як пряма АСВ, що проходить через точки в яких сконцентровані маси m_1, m_2, m_3, співпадає з віссю шатуна.

Вирішивши приведену вище систему рівнянь, отримаємо:

$$\left| \begin{array}{l} m_1 = \dfrac{G_1}{g} = \dfrac{J_c}{l_1 \cdot l}; \\ m_2 = \dfrac{G_2}{g} = \dfrac{J_c}{(l - l_1) \cdot l}; \\ m_3 = \dfrac{G_3}{g} = m_ш - \dfrac{J_c}{(l - l_1) \cdot l} - \dfrac{J_c}{l_1 \cdot l}; \end{array} \right. \qquad (2.4)$$

де $G_ш$, G_1 G_2 G_3 – відповідно вага шатуна і його частин;

l, l_1 – відповідно загальна довжина шатуна та довжина від центру мас до його верхньої головки ($l_2 = l - l_1$);

$m_ш$, m_1, m_2, m_3 – відповідно маси шатуна та частин.

Маса m_1 шатуна сконцентрована в точці A і рухається зворотно-поступально уподовж осі циліндру; маса m_2 сконцентрована в точці C і здійснює обертальний рух відносно осі колінчастого валу; маса m_3 шатуна віднесена до його центру мас і здійснює складний рух; $m_ш$ – загальна маса шатуна.

Сили інерції шатуна приведені відносно його центру мас (точка C) до головного моменту сил інерції і результуючої сили інерції, розкладеної за відповідними осями [90].

З рівняння моментів активних сил та сил інерції відносно точки *B* отримаємо вираз для визначення нормальної сили *N*:

$$N = \frac{-P_{in} \cdot b - P_{iш} \cdot c - K_{ш} \cdot l_2 + P_г \cdot b - F_{ko} \cdot b}{a}, \qquad (2.5)$$

де P_{in} – сила інерції зворотно-поступального руху поршня;

b – відстань від проекції на ось x центру мас шатуна до точки С;

$P_{iш}$ – сила інерції маси m_3 шатуна діючої паралельно осі циліндра;

c – проекція кривошипа на вісь x;

$K_ш$ – дотична сила інерції маси m_3 шатуна прикладеної до його центру ваги і діюча перпендикулярно осі;

F_{ko} – сила тертя кілець об дзеркало гільзи циліндрів.

Силу інерції зворотно-поступального руху поршня виражають:

$$P_{in} = -(m_n + m_1) \cdot j = -(m_n + m_1) \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{cos(\varphi + \beta}{cos(\beta)} + \lambda \cdot \frac{cos^2 \varphi}{cos^3(\beta)} \right), \qquad (2.6)$$

де m_n – маса поршня;

j – прискорення зворотно-поступального руху поршня;

φ – кут нахилу кривошипа;

r– радіус кривошипа;

λ – відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна.

Силу інерції $P_{iш}$ визначають користуючись залежністю:

$$P_{jш} = -m_3 \cdot j = -m_3 \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{cos(\varphi + \beta)}{cos(\beta)} + \lambda \cdot \frac{cos^2 \varphi}{cos^3 \beta} \right), \qquad (2.7)$$

де ω – кутова швидкість обертання колінчастого валу двигуна.

Масу m_3 та силу інерції $K_ш$, викликану цією масою, визначають за формулами:

$$m_3 = m_ш - (m_1 + m_2), \qquad (2.9)$$

$$K_ш = -m_3 \cdot \varepsilon_ш \cdot l_1, \qquad (2.10)$$

де $\varepsilon_ш$ – кутове прискорення качання шатуна.

Кутове прискорення качання шатуна описується рівнянням:

$$\varepsilon_{ш} = \lambda \cdot \omega^2 \cdot sin\,\varphi \cdot \frac{\lambda^2 - 1}{\left(1 - \lambda^2 \cdot sin^2\,\varphi\right)^{\frac{3}{2}}}, \qquad (2.11)$$

Сила тертя кілець об дзеркало гільзи F_{ko} значною мірою залежить від технічного стану кілець та гільзи циліндрів, а також від якості роботи системи мащення двигуна та швидкісного режиму. На основі кінематичних і конструктивних співвідношень дану силу можна визначити за залежністю:

$$F_{ko} = \pi \cdot D \cdot f \cdot P_{uk} \cdot (h_1 \cdot i_k + \xi \cdot h_2 \cdot i_m), \qquad (2.12)$$

і відповідно

$$\xi = \frac{P_{uk}}{P_{um}}, \qquad (2.13)$$

де D – діаметр циліндра;

f – динамічний коефіцієнт тертя;

P_{uk} – сила жорсткості компресійного кільця;

P_{um} – сила жорсткості маслоз'ємного кільця;

h_1 – висота компресійного кільця;

h_2 – висота маслоз'ємного кільця;

i_k, i_m – відповідно кількість компресійних та маслоз'ємних кілець.

У процесі зношування і зниженні жорсткості поршневих кілець їх сила тертя об дзеркало циліндра зменшується. В результаті цього перекладка поршня і удар його об гільзу буде проходити при меншому значенні бокової сили N та з деяким випередженням фази, чим при кільцях з початковим технічним станом.

Підставивши формули (2.4–2.10), в (2.5) та зробивши відповідні перетворення отримаємо формулу для визначення сили N у функції від кута нахилу шатуна:

$$N = \left[P_г - (m_n + m_1) \cdot j - F_{ko} - m_3 \cdot j \cdot \frac{l_2}{l} \right] \cdot tg\beta - \frac{m_3 \cdot \varepsilon_{ш} \cdot l_1 \cdot l_2}{l \cdot cos\,\beta}, \qquad (2.14)$$

Так, як за основну діагностичну ознаку прийнята фаза виникнення віброімпульсу, виразимо рівняння 2.14 у функції від φ. Для цього врахуємо наступне:

$$sin\beta = \lambda \cdot sin\varphi, \tag{2.15}$$

$$cos\beta = \sqrt{1-\lambda^2 \cdot sin^2\varphi}, \tag{2.16}$$

Тоді остаточне рівняння для визначення рівнодіючої бокової сили N матиме вигляд:

$$N = \left[P_г - (m_n + m_1 + m_3 \cdot \frac{l_2}{l}) \cdot j - F_{ko} \right] \cdot \frac{\lambda \cdot sin\varphi}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot sin^2\varphi}} - \\ - \frac{m_3 \cdot \varepsilon_ш \cdot l_1 \cdot l_2}{l \cdot \sqrt{1-\lambda^2 \cdot sin^2\varphi}}, \tag{2.17}$$

Таким чином бокова сила N, виражена у функції кута повороту кривошипа, залежить від сили газів, сили тертя кілець об дзеркало гільзи, геометричних параметрів кривошипно–шатунного механізму та швидкісного режиму роботи двигуна.

2.1.2. Аналітичне визначення сили газів в момент удару поршня

Зусилля від тиску газів, які знаходяться в надпоршневому просторі двигуна, викликають напруження головки циліндра і поршня. Значення сили тиску газів у циліндрі двигуна в залежності від ходу поршня визначають за індикаторною діаграмою. Її будують за даними теплового розрахунку [16,17].

Однак користуватися даними індикаторної діаграми не зручно, так як в рівняння радіального переміщення поршня повинна входити теоретична залежність зміни тиску газів у функції від кута повороту кривошипа $P_г = f(\varphi)$. Деякі роботи містять в собі відомості стосовно питання визначення цієї сили [2,16,17,106]. Але, так як перекладка поршня здійснюється в невеликому інтервалі (від ВМТ до моменту удару – 6-26° повороту колінчатого валу), більшість дослідників не враховують зміну сили $P_г$ від положення поршня на цьому інтервалі. Вони приймали значення цієї сили для положення

поршня у ВМТ (P_c – тиск в кінці стиснення), або тиск в кінці згорання (P_z), або ж середній індикаторний тиск (P_i) за цикл розширення. Всі ці варіанти на нашу думку не можуть в повній мірі відобразити цей складний процес.

У зв'язку з цим нами пропонується методика визначення сили $P_г$ від кута повороту колінчатого валу на різних швидкісних режимах роботи двигунів СМД.

Сила тиску газів для дизельних двигунів визначається за формулою [106]:

$$P_г = \frac{P_Z}{\left(1 + \frac{S}{S_c}\right)^{n_2}}, \qquad (2.17)$$

де P_z – тиск в кінці згорання;

S, S_c – відповідно значення положення поршня поточне та на початку згорання;

n_2 – середнє значення політропи розширення.

Дану формулу можна перетворити в дещо зручнішу для розрахунку:

$$P_г = \frac{P_Z}{\left(1 + \frac{V}{V_c}\right)^{n_2}}, \qquad (2.18)$$

де V, V_c – об'єм камери згорання відповідно в довільній точці індикаторної діаграми та камери стиснення.

Середнє значення політропи розширення описується емпіричним рівнянням В.А. Петрова [17]:

$$n_2 = 1.12 + \frac{130}{n}, \qquad (2.19)$$

де n – поточне значення обертів колінчастого вала двигуна.

Тиск газів в кінці згорання P_z можна визначити виходячи з виразу ступеню підвищення тиску [106]:

$$P_z = P_c \cdot \lambda_1, \qquad (2.20)$$

де P_c – тиск в кінці стиснення;

λ_1 – ступінь підвищення тиску.

Значення P_z для сучасних середньофорсованих дизельних двигунів лежить в межах від 6 до 12 МПа. Чим вище λ_1, тим більша кількість палива повинна згорати при V= const. Для даних марок двигунів λ_1 знаходиться в межах 1,8…2,5.

Поточне значення об'єму камери згорання V знаходиться за формулою:

$$V = S \cdot F_n = S \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \qquad (2.21)$$

Поточне значення положення поршня відносно ВМТ описується залежністю [90]:

$$S = r \cdot \left[\left(1 - cos\,\varphi\right) + \frac{\lambda}{4} \cdot \left(1 - cos\,2\varphi\right) \right], \qquad (2.22)$$

Тиск в кінці стиснення P_c значною мірою залежить від швидкісного режиму [2] і може визначатися за відношенням:

$$P_c = b_0 + b_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_н} \right)^2, \qquad (2.23)$$

при цьому $$b_0 = 0.08 \cdot \varepsilon^{n_1}, \qquad (2.24)$$

а $$b_2 = \left(P_a - 0.08\right) \cdot \varepsilon^{n_1}, \qquad (2.25)$$

де b_0 – коефіцієнт підвищення тиску;

b_2 – коефіцієнт підвищення тиску в кінці впуску за рахунок наддуву;

ω, $\omega_н$ – відповідно поточна та номінальна кутова швидкість;

ε – ступінь стиснення;

n_1 – середнє значення політропи стиснення;

P_a – тиск в кінці впуску.

Значення політропи стиснення n_1 можна визначити за рівнянням отриманим В.А. Петровим за експериментальними даними [16]:

$$n_1 = 1.46 - \frac{100}{n} \qquad (2.26)$$

Значення тиску в кінці впуску визначається за результатами теплового розрахунку, однак для средньофорсованих двигунів з наддувом, до яких відноситься і група двигунів СМД, тиск P_a є похідною від тиску наддуву $P_к$ і становить 94% від нього [2].

Із виразу (2.23) випливає, що тиск в кінці такту стиснення, при певному режимі роботи двигуна на різних стадіях експлуатації, значною мірою залежить від тиску наддуву та ступеню стиснення.

Середній індикаторний тиск для одного циліндра P_i в загальному вигляді пов'язаний із зовнішнім навантаженням на двигун і може бути знайденим за виразом [2]:

$$P_i = \frac{2\pi \cdot k \cdot M_B}{z \cdot V_ц \cdot \eta_m}, \qquad (2.27)$$

при умові, що:

$$M_B \le M_e(\omega), \qquad (2.28)$$

де $M_e(\omega)$ – ефективний крутний момент на досліджуваному швидкісному режимі;

M_B – крутний момент на досліджуваному швидкісному режимі;

k – тактність двигуна;

z – загальне число циліндрів;

η_m – механічний коефіцієнт корисної дії двигуна.

Однак користуватися формулою (2.27) не завжди зручно, так як складно визначити по перше крутний момент, а по друге діагностування проходить на двигуні, який працює на холостому режимі і тому має занижене значення M_B. Тому середній індикаторний тиск P_i зручніше визначати за результатами теплового розрахунку [17].

При цьому розрізняють розрахункове і дійсне значення середнього індикаторного тиску:

$$P_i = \varphi \cdot p_i' = 0.94 \cdot p_i', \qquad (2.29)$$

де p_i' – розрахункове значення середнього індикаторного тиску.

Розрахункове значення середнього індикаторного тиску описується залежністю:

$$p_i' = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\lambda_1 \cdot (\rho - 1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right], \quad (2.30)$$

де δ – ступінь подальшого розширення

ρ – ступінь попереднього розширення (1,2…1,7).

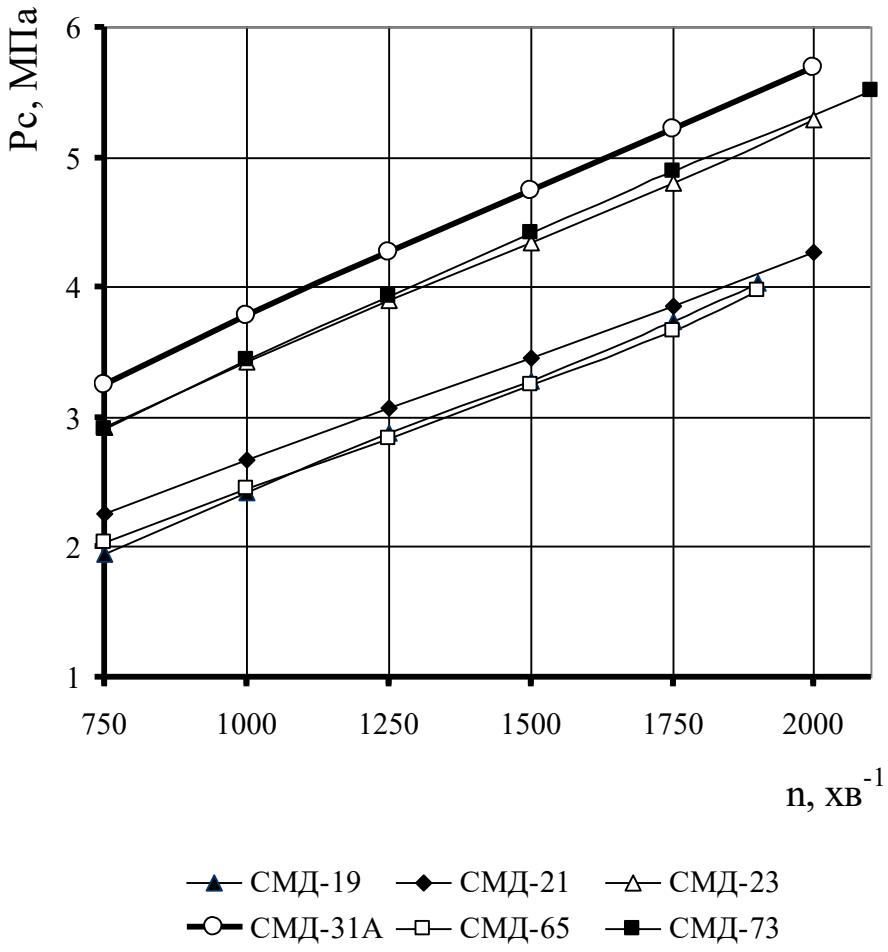
Ступінь подальшого розширення може бути обчислена у вигляді:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad (2.31)$$

Дані розрахунків за формулами (2.23, 2.31) наведені рис.2.3.

Як видно з графіків наростання середнього індикаторного тиску та тиску в кінці стиснення здійснюється майже по прямій лінії. Для енергетичної установки кут нахилу прямих становить відповідно близько 29° та 26°. Аналізуючи дані графіка можна відмітити значну відмінність значень P_i та P_c. Наприклад, для того ж двигуна різниця між зазначеними показниками для номінального режиму становить 3,08 МПа. Значення P_c більш ніж в 4 рази перевищує значення P_i для дизельних енергетичних установок, а по всіх інших марках це перевищення сягає > 2.

Це свідчить про те, що під час підстановки в рівняння (2.20) цих значень буде отримано зовсім різні результати значення сили N, а це призведе до збільшення розбіжності між теоретичними та



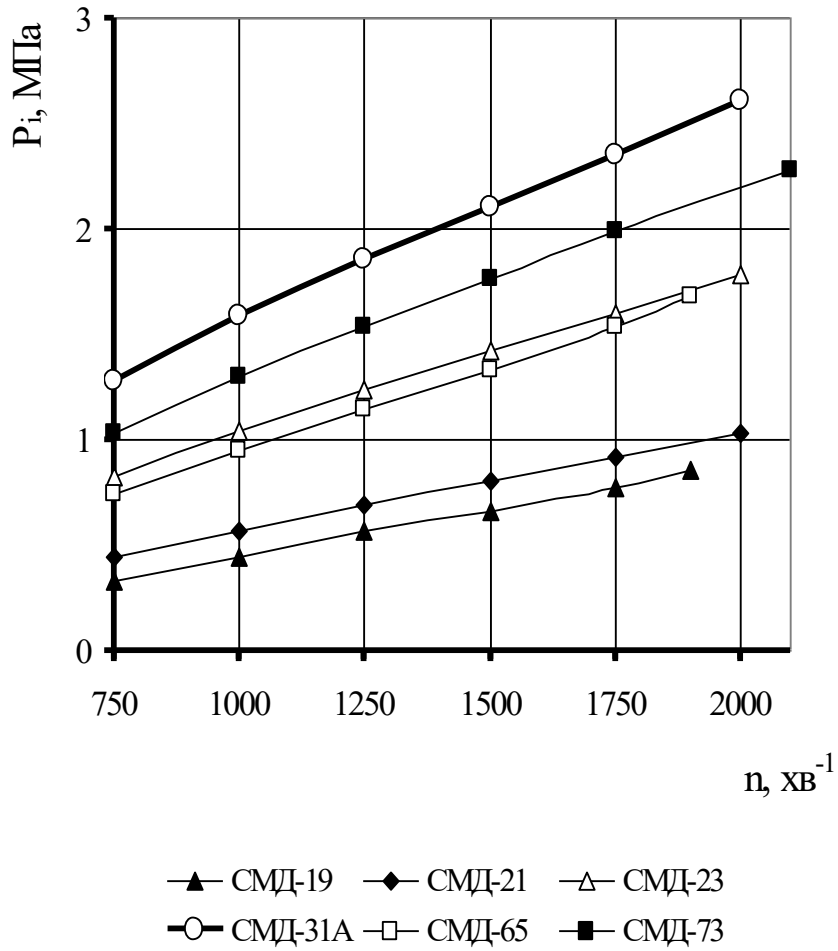


Рис.2.3. Зміна тиску в кінці такту стиснення Pc та середньоіндикаторного тиску Pi від обертів колінчастого валу n для різних марок двигунів СМД.

експериментальними даними, що і вплине на достовірність (точність) постановки діагнозу.

При термодинамічному аналізі ідеальних циклів приймають, що згорання в дизелях проходить спочатку при V=const, а потім при P= const, тобто по циклу із змішаним підведенням тепла. В реальному процесі, з моменту подачі палива в циліндр, проходять складні фізичні і хімічні процеси запалювання та згорання палива, причому характер зміни тиску по куту повороту колінчатого валу реального процесу згорання різко відрізняється від ідеальної діаграми циклу із змішаним підведенням тепла. Тому графік приведений на рис. 2.4 відображає частину ідеальної діаграми циклу із змішаним підведенням тепла для двигуна. Даний графік побудований на основі розрахунків по формулі (2.18). Інтервал цієї діаграми від ВМТ до 6° є суто теоретичним. У реальному двигуні на цьому проміжку йде наростання тиску від P_c до P_z. Дане явище закінчується при повороті колінчатого валу через 6..8° після ВМТ. Але за даними багатьох дослідників основна діагностична зона, в межах якої відбувається перекладка поршня в зазорі ЦПГ, складає відрізок від 6 до 26° після ВМТ, тому зона від ВМТ до 6° не приймається до уваги в математичній моделі при постановці діагнозу технічного стану даного з’єднання. Порівняльна характеристика величин сили газів різних двигунів показана на рис.2.5. Як видно з нього найбільш напружену роботу мають енергетичні установки.

Результати остаточного розрахунку результуючої сили за залежністю (2.20), яка здійснює радіальне переміщення поршня наведена на рис.2.6.

Розрахунки показують що до 30° проходить різке зростання цієї сили. Зважаючи на дані літературних джерел [3,11,28,48,49], які стверджують що удар проходить на проміжку до 30° подальший розрахунок вище цієї межі можна не проводити, так як значення сили N вище 30° завжди буде меншим ніж на цьому проміжку. Однак, проводячи теоретичні дослідження цього рівняння, можна зробити висновок, що при деякому співвідношенні мас

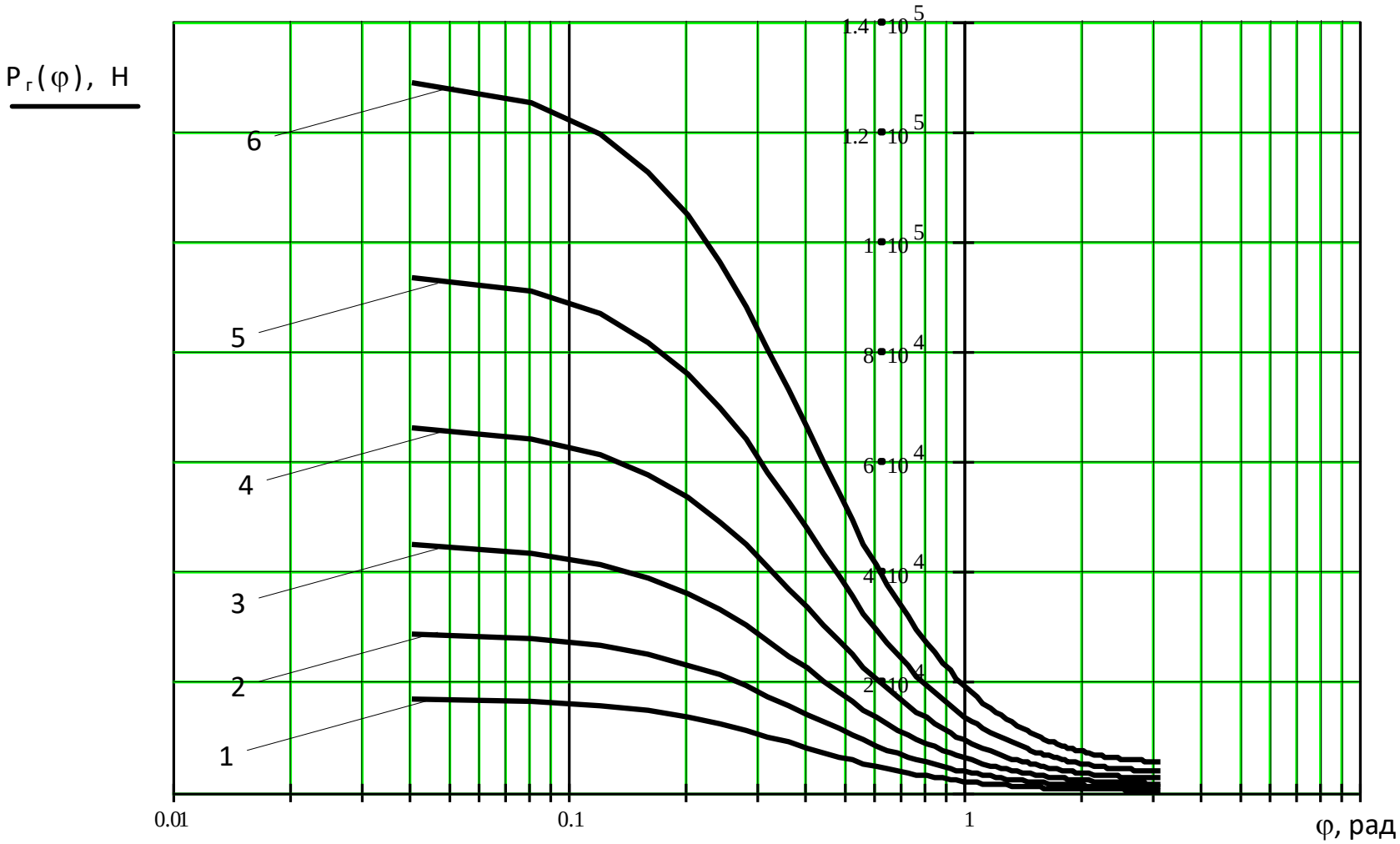


Рис.2.4. Залежність сили газів $P_г(\varphi)$ на робочому ході від кута повороту колінчастого валу φ двигуна СМД-31А та частоти обертання *n* при :
1 -n = 750; 2 -n = 1000; 3 -n = 1250; 4 - n =1500; 5 - n =1750; 6 - n =2000 хв$^{-1}$.

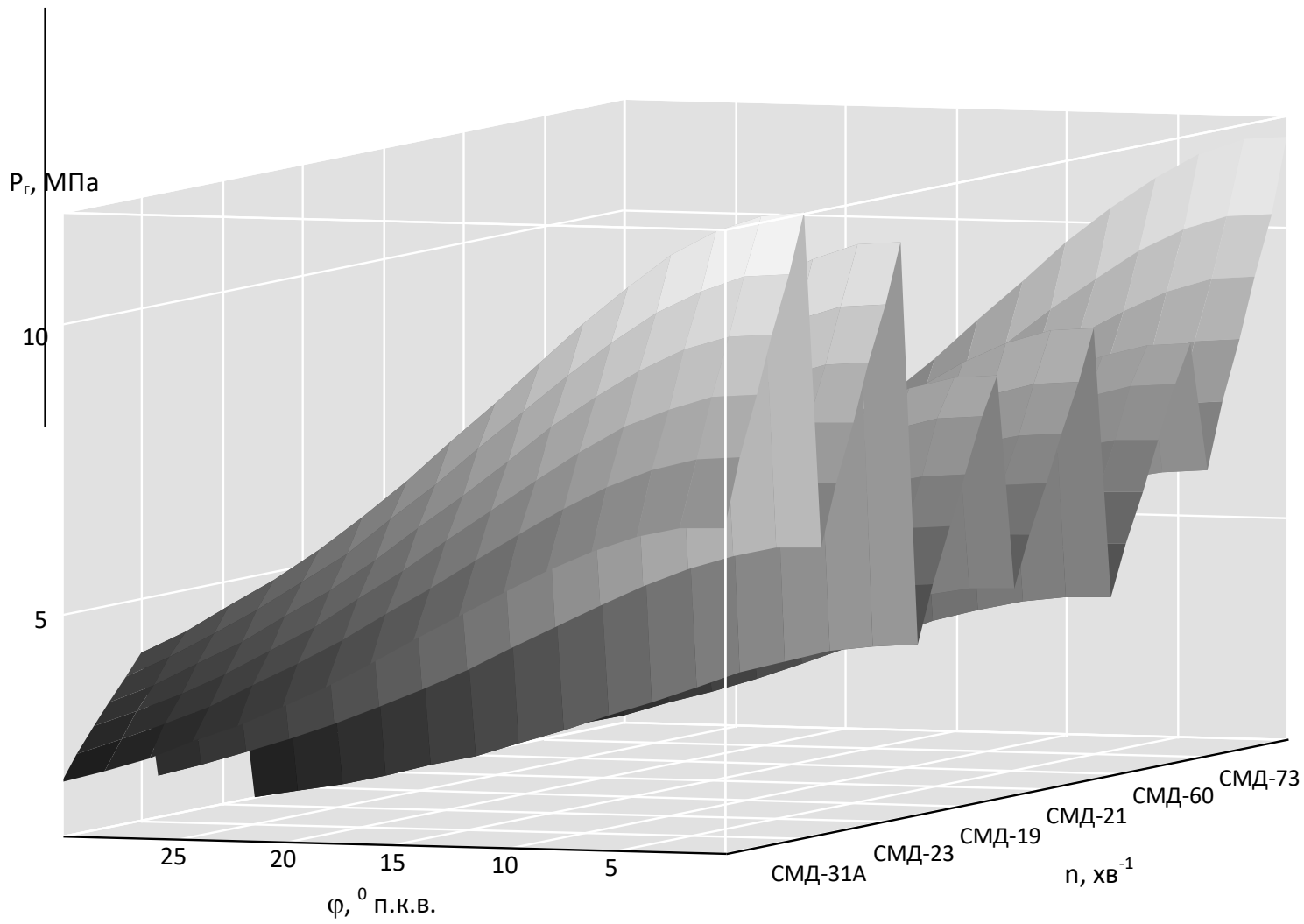


Рис.2.5. Поверхня розподілу сили тиску газів $P_г$ на поршень в залежності від кута повороту колінчастого валу φ та обертів n для різних марок двигунів.

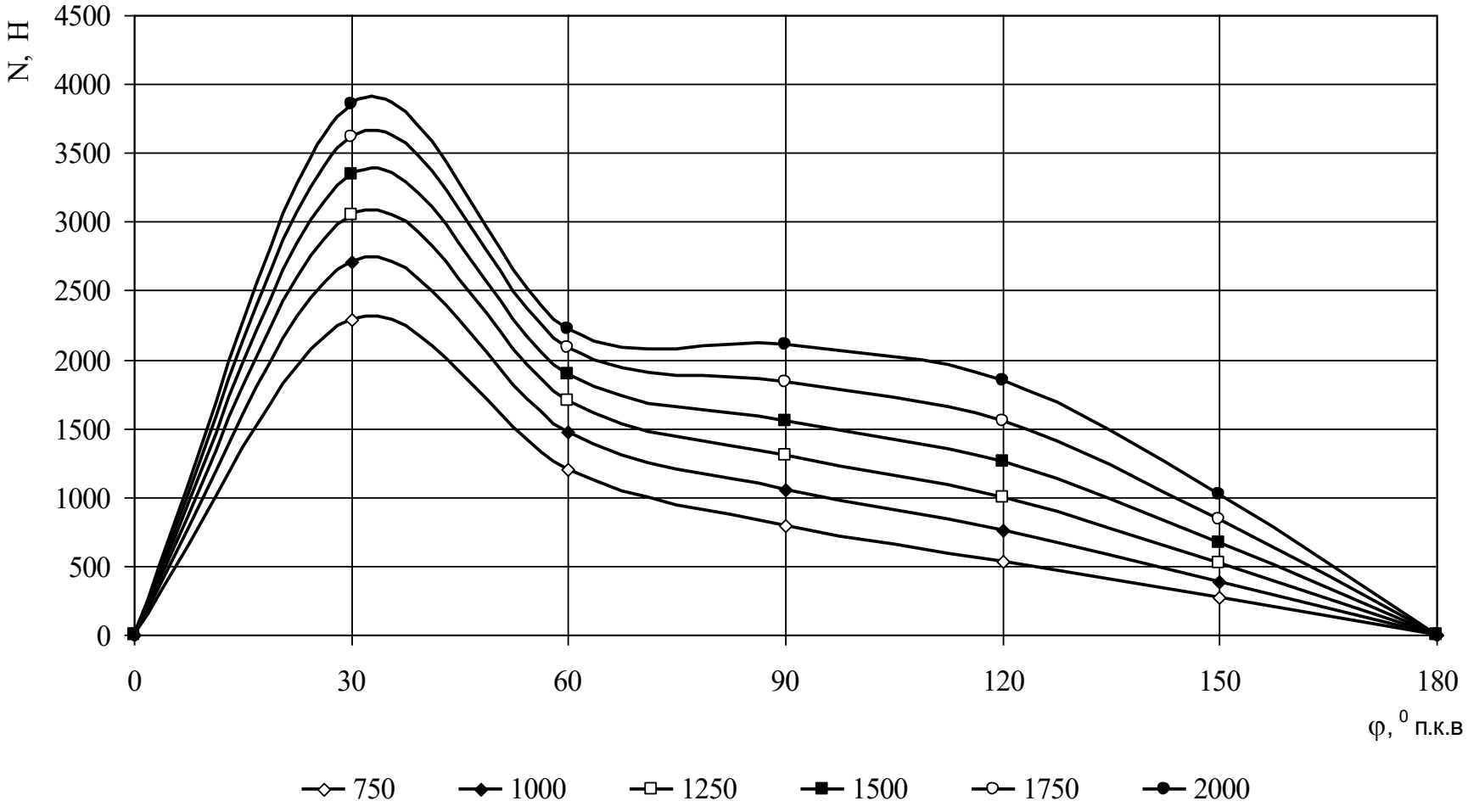


Рис.2.6. Залежність бокової сили N від кута повороту колінчастого валу φ на різних швидкісних режимах роботи дизельного двигуна СМД - 31А.

поршня і шатуна, на діаграмі має місце зростання сили N (за рахунок сили інерції) на інтервалі 90–120°, що значно перевищує значення на першому інтервалі від 0 до 30^0. Це може призвести до того, що удар поршня пройде значно пізніше очікуваної зони, або буде мати місце подвійний удар.

2.1.3. Кінематика радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ

За попередніми експериментальними дослідженнями ряду авторів рух поршня в процесі його перекладки в зазорі в загальному випадку складається з поступального руху центру інерції поршневого комплекту та обертального руху навколо осі, що проходить через цей центр, паралельно поршневому пальцю.

Аналізуючи математичну модель радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ (за Аллілуєвим В.О.) нами відмічено, що хоча автор і не заперечує складність радіального руху поршня, однак його модель враховує тільки поступальний рух останнього. Це пояснюється відсутністю на той час потужної обчислювальної техніки, за допомогою якої можна було б вирішити подібні проблеми. Тому автор йшов на спрощення своєї моделі не враховуючи при цьому багато факторів. Така спрощена модель не може в повній мірі описати даний механізм без врахування всіх можливих сил, які діють в реальному механізмі.

У загальному випадку процес радіального переміщення поршня можна розділити на 6 фаз [57]:

- поршень обома кінцями юбки прилягає до однієї із стінок циліндра;
- верхній кінець юбки відривається від стінки циліндра і поршень повертається навколо другого кінця;
- поршень вільно рухається в циліндрі, а саме обома кінцями відривається від однієї стінки і не встигає дістатися ні одним кінцем до другої стінки циліндра;
- поршень ударяється своїм верхнім кінцем об другу стінку циліндра;
- він повертається навколо верхнього кінця юбки;
- нижнім кінцем юбки поршень ударяється об гільзу.

Всі ці 6 фаз при кожному русі не завжди відбуваються. Проте майже завжди присутні 5 і 6 фази. Якщо при побудові математичної моделі руху поршня враховувати тільки поперечний рух поршня і не враховувати обертальний, то величина методичної похибки складе для простих двигунів 5% [81], для середньофорсованих – близько 6%. Це, відносно зазору, збільшує похибку його визначення до 1°.

Щоб уникнути даної похибки необхідно врахувати не тільки поперечний, а й обертальний рух поршня. Максимальний кут нахилу поршня в зазорі залежить в основному від геометричних розмірів поршня. В загальному випадку (рис. 2.7) цю залежність можна описати рівнянням:

$$\gamma(h) = f(D, H, K), \qquad (2.32)$$

де H – висота поршня;

K – відстань від поршневого пальця до нижнього краю юбки;

γ – кут нахилу поршня.

При врахуванні обох видів переміщення швидкість любої точки поршня буде рівна векторній сумі швидкостей при поступальному і обертальному рухах.

На схемі (рис2.7) зображено гранично можливий випадок складного руху, коли при поступальному русі $h'' \approx h_1$ поршень одночасно повертається відносно вісі, що проходить через поршневий палець на максимально можливий кут γ.

$$\vec{v}_i = \vec{v}_p + \vec{v}_o \qquad (2.33)$$

де $\vec{v}_i, \vec{v}_p, \vec{v}_o$ – відповідно вектори довільної точки при поступальному та обертальному рухах.

В цьому випадку модуль швидкості нижньої кромки юбки поршня

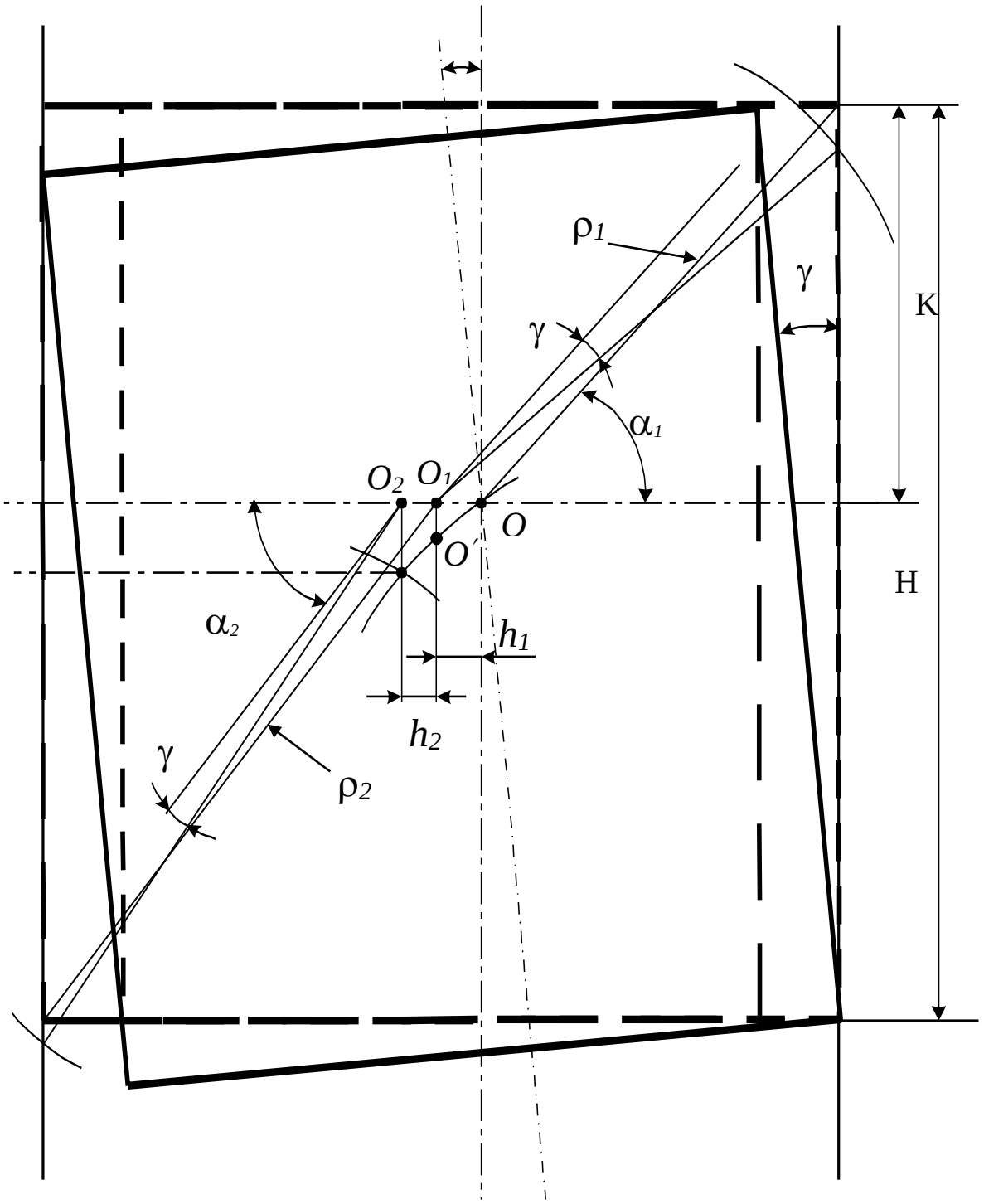


Рис.2.7. Схема розрахунку кута нахилу поршня γ

визначається за залежністю [81]:

$$|v_i| = \sqrt{(\sum v_x)^2 + (\sum v_y)^2}\,, \qquad (2.34)$$

де $\sum v_x, \sum v_y$ – сума проекцій швидкостей на відповідні осі.

$$\begin{cases} \sum v_x = v''_p + v_o \cdot cos\,\theta; \\ v''_p = \dfrac{h'' \cdot \omega}{\varphi}; \\ v_o = \dfrac{\rho_1 \cdot sin(\gamma)}{\varphi} \cdot \omega; \\ \sum v_y = v_o \cdot sin\,\theta. \end{cases}, \qquad (2.35)$$

де θ – кут між напрямом цих векторів.

Кут між векторами швидкостей визначається [81]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \gamma - \alpha_1, \qquad (2.36)$$

У загальному випадку кожному значенню зазору відповідає єдине значення максимального кута нахилу поршня. При цьому сам кут можна визначити вирішивши систему рівнянь і врахувавши, що $|OO_1| = h_1$, а $|O_1O_2| = h_2$:

$$\begin{cases} h_1 = \rho_1 \cdot cos(\alpha_1 - \gamma) - \rho_1 \cdot cos(\gamma); \\ h_2 = \rho_2 \cdot cos(\alpha_2 - \gamma) - \rho_2 \cdot cos(\gamma); \\ h = h_1 + h_2. \end{cases} \qquad (2.37)$$

де h_1 – переміщення поршня при поступальному рухові;

h_2 – переміщення поршня при обертальному рухові;

h – загальне переміщення поршня при обох видах руху (зазор);

ρ_1 – радіус обертання головки поршня;

ρ_2 – радіус обертання юбки поршня;

α_1 , α_2 – кути між радіусом обертання і твірною поверхнею поршня.

Виразимо значення радіусів обертання та кути через геометричні розміри поршня:

$$\rho_1 = \sqrt{K^2 + \frac{D^2}{4}}, \tag{2.38}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(H-K)^2 + \frac{D^2}{4}}, \tag{2.39}$$

$$\alpha_1 = arcsin\left(\frac{K}{\sqrt{K^2 + \frac{D^2}{4}}}\right), \tag{2.40}$$

$$\alpha_2 = arcsin\left(\frac{H-K}{\sqrt{(H-K)^2 + \frac{D^2}{4}}}\right), \tag{2.41}$$

Підставивши (2.38-2.41) в систему (2.37) маємо:

$$\begin{cases} h_1 = \sqrt{K^2 + \frac{D^2}{4}} \cdot \left[cos \cdot \left(arcsin\left(\frac{K}{\sqrt{K^2 + \frac{D^2}{4}}}\right) - \gamma \right) - cos\left(\frac{K}{\sqrt{K^2 + \frac{D^2}{4}}}\right) \right] \\ h_2 = \sqrt{(H-K)^2 + \frac{D^2}{4}} \cdot \left[cos \cdot \left(arcsin\left(\frac{H-K}{\sqrt{(H-K)^2 + \frac{D^2}{4}}}\right) - \gamma \right) \right] - \\ - cos\left(\frac{H-K}{\sqrt{(H-K)^2 + \frac{D^2}{4}}}\right) \end{cases} \tag{2.42}$$

Після підстановки даних рівнянь в третє рівняння системи (2.37) ,та після деяких символьних перетворювань в системі MathCad2000Pro отримаємо:

$$h(\gamma)=\frac{1}{2}\sqrt{4K^2+D^2}\left[cos\left(a\,sin\left(\frac{2K}{\sqrt{4K^2+D^2}}\right)-\gamma\right)-\sqrt{1-\frac{4K^2}{\left(4K^2+D^2\right)}}\right]+$$

$$\frac{1}{2}\sqrt{4H^2-8H\cdot K+4K^2+D^2}\left[cos\left(a\,sin\left(\frac{2(H-K)}{\sqrt{4H^2-8H\cdot K+4K^2+D^2}}\right)-\right.\right. \quad (2.43)$$

$$\left.\left.-\gamma\right)-\sqrt{1-\frac{4(H-K)^2}{\left(4H^2-8H\cdot K+4K^2+D^2\right)}}\right]$$

Як бачимо, кут нахилу поршня залежить тільки від його геометричних параметрів. Дане рівняння використовується в подальшому для визначення початкових умов для диференційних рівнянь радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ.

2.1.4. Динаміка радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ

При віброакустичному діагностуванні циліндро-поршневої групи дизельних двигунів важливо знати закономірності переміщення поршня в циліндрі. Як було відмічено вище поршень здійснює поряд із зворотно-поступальним рухом уздовж осі циліндра, поперечний рух перпендикулярно цій осі в межах існуючого зазору. Відомі на цей час аналітичні моделі стосовно динаміки поршня, базуються на спрощеному уявленні поперечного руху поршня. Вони зроблені на припущенні того, що поршень під час перекладки здійснює тільки поступальний рух, тобто твірна поршня в любий момент часу залишається паралельною твірній гільзи. Насправді ж цей рух значно складніший.

Деякі роботи містять відомості про складний рух поршня в процесі його перекладки [49,57,80,82,]. Однак у них приведено в основному експериментальний матеріал про ці дослідження. При цьому більшість з них обмежилася поступальним рухом. Послідовно закінченого теоретичного уявлення (моделі) складного руху поршня при його перекладці, яке б відповідало реальним умовам на сьогоднішній час не склалося. Тому суттєвим є розробка такої динамічної теоретичної моделі, яка враховувала б всі можливі сили, які присутні в реальному механізмі.

Для цього розглянемо схему сил і моментів цих сил, діють на поршень. Динаміку поршня розглянемо для умов плоско-паралельного руху.

Виберемо в площині руху систему координат xOy нерухому по відношенні до цієї площини (рис.2.8). При цьому врахуємо, що вісь x направлена вздовж вісі циліндра, а вісь y перпендикулярна їй.

У зв'язку з тим, що в початковий момент часу t після переходу поршня через ВМТ (робочий хід) v – швидкість його різко збільшується за рахунок швидкого наростання тиску в циліндрі (інтенсивне горіння робочої суміші). Шатун не встигає по швидкості за поршнем. При цьому створюється обертальний момент відносно осі поршневого пальця, який і прагне перекласти поршень від однієї стінки циліндра на іншу.

Тоді, враховуючи вище сказане, система рівнянь, які описують дане переміщення, відносно розглянутих координат матиме вигляд:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2}{dt^2}x = P_г \cdot cos\,\gamma - R - P_{gd} \cdot sin\,\gamma - P_t \cdot cos\,\gamma - F_{kp} \cdot sin\,\gamma \\ m\dfrac{d^2}{dt^2}y = -P_г \cdot sin\,\gamma + N - P_{gd} \cdot cos\,\gamma + P_t \cdot sin\,\gamma - F_{kp} \cdot cos\,\gamma \\ I_0\dfrac{d^2}{dt^2}\gamma = -P_{gd} \cdot L_j + N \cdot L_j \cdot cos\,\gamma - R \cdot L_j \cdot sin\,\gamma + F_{kp} \cdot L_k + P_t \cdot \dfrac{D}{2} - M_0 \end{cases} \qquad (2.44)$$

де m – маса поршня і частина маси шатуна, що рухаються поступально

$m = m_n + m_1$;

R – вертикальна складова реакції шатуна $R_ш$;

N – горизонтальна складова реакції шатуна $R_ш$;

P_{gd} – гідродинамічний тиск в масляному шарі;

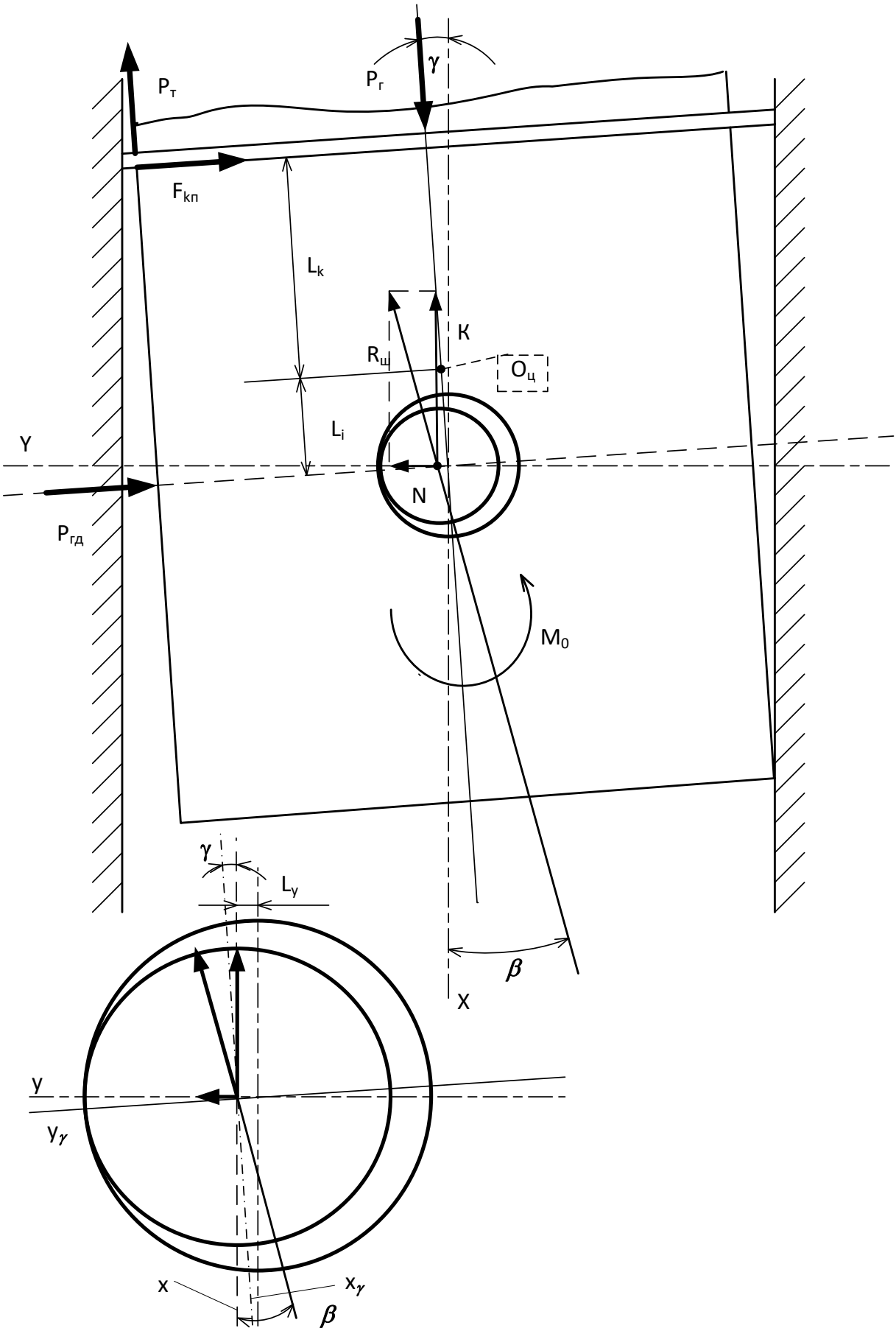


Рис.2.8. Схема сил, які діють на поршень при його перекладці.

P_t – сила тертя поршня об гільзу;

I_0 – момент інерції поршневого комплекту відносно центру тяжіння $O_{ц.т}$;

L_j – координата рівнодіючої гідродинамічного тиску в шарі оливи відносно центру тяжіння $O_{ц.т}$;

L_k – координата нижнього кільця відносно $O_{ц.т}$;

L_y – дезаксаж поршневого пальця;

F_{kp} – сила тертя кілець об гільзу;

M_0 – момент сили тертя поршневого пальця об верхню головку шатуна.

Дана система рівнянь записана без врахування сил тертя поршневих кілець об гільзу (F_{ko}), яка враховувалася при визначенні бокової сили N, а сили тертя усіх кілець об поршень та поршневого пальця об верхню головку шатуна замінені одними силами, які визначається за спрощеними формулами:

$$F_{kp} = P_г \cdot f;$$

$$M_0 = r_p \cdot f \qquad (2.45)$$

де r_p - радіус поршневого пальця.

Для визначення траєкторії, швидкості і прискорення довільної точки площини поршня перейдемо до рухомої системи координат $x_\gamma O y_\gamma$, полюс якої співпадає з точкою O, тобто осі координат нерухомої і рухомої систем мають спільний початок.

Для переходу від нерухомої системи координат до рухомої скористаємося формулами перетворення координат при повороті координатних осей (рис.2.9) відносно нерухомої системи xOy:

$$\begin{cases} y_\gamma = x \cdot sin\gamma + y \cdot cos\gamma \\ x_\gamma = x \cdot cos\gamma - y \cdot sin\gamma \end{cases} \qquad (2.46)$$

Дана система рівнянь є рівняннями руху довільної точки фігури в її площині. Для виконання цього $x_\gamma O y_\gamma$ переходу помножимо перше рівняння системи (2.44) на $sin\gamma$, а друге на $cos\gamma$. При цьому врахуємо, що $R = N \cdot ctg\gamma$.

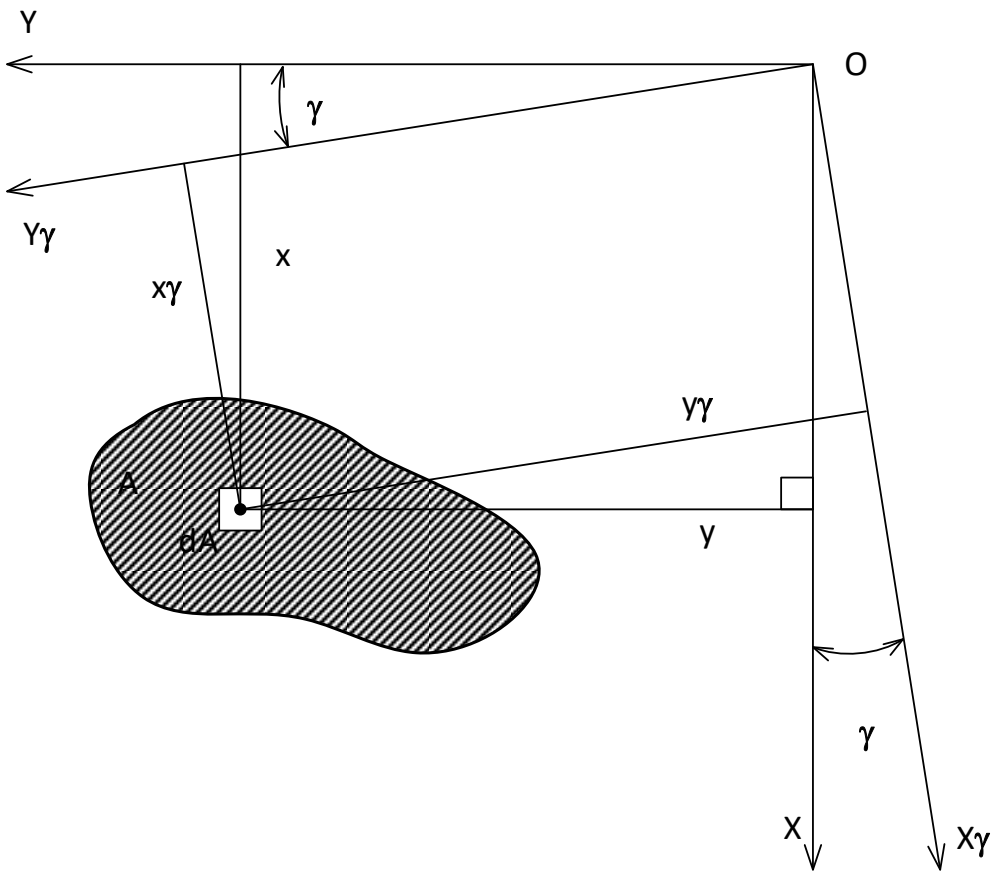


Рис.2.9. Схема повороту координатних осей.

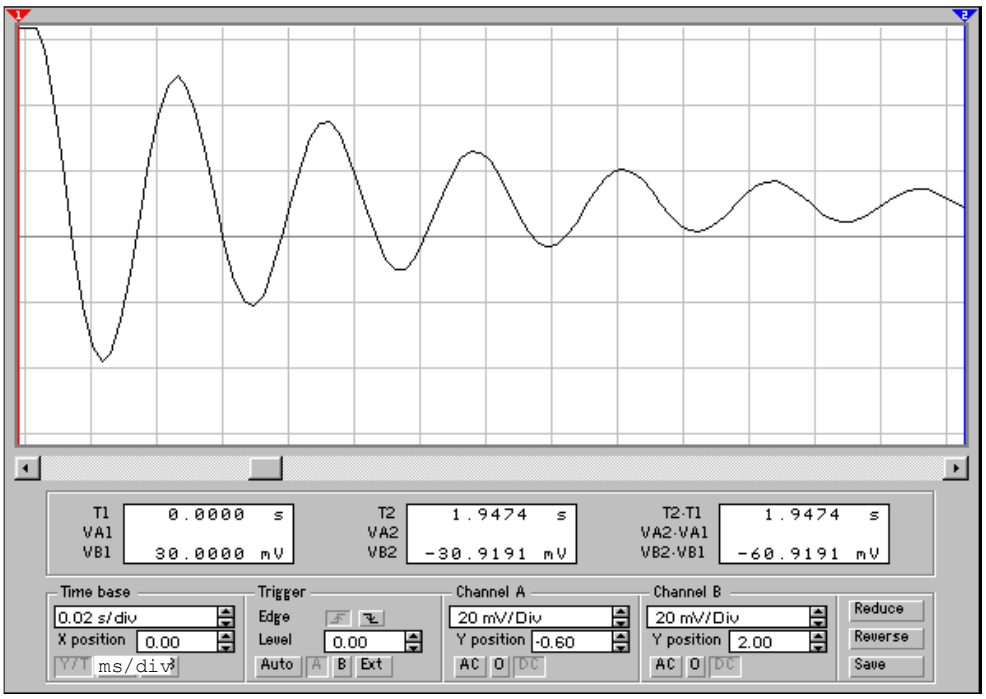


Рис.2.10. Реалізація моделі елементарного акустичного імпульса затухаючої синусоїди

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2}{dt^2}\left(x\cdot sin\gamma\right)=P_г\cdot cos\gamma\cdot sin\gamma-N\cdot ctg\gamma\cdot sin\gamma-P_{gd}\cdot sin^2\gamma- \\ -P_t\cdot cos\gamma\cdot sin\gamma-F_{kp}\cdot sin^2\gamma \\ m\dfrac{d^2}{dt^2}\left(y\cdot cos\gamma\right)=-P_г\cdot sin\gamma\cdot cos\gamma+N\cdot cos\gamma-P_{gd}\cdot cos^2\gamma+ \\ +P_t\cdot sin\gamma\cdot cos\gamma-F_{kp}\cdot cos^2\gamma \\ I_0\dfrac{d^2}{dt^2}\gamma=-P_{gd}\cdot L_j+N\cdot L_j\cdot cos\gamma-N\cdot L_j\cdot\dfrac{sin\gamma}{tg\beta}+F_{kp}\cdot L_k+P_t\cdot\dfrac{D}{2}-M_0 \end{cases} \tag{2.47}$$

Просумувавши праві і ліві частини першого і другого рівняння системи (2.47) перейдемо до рухомої системи координат. При цьому врахуємо, що:

$$L_y=L_j\cdot sin\gamma, \tag{2.48}$$

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2}{dt^2}\left(\overbrace{x\cdot sin\gamma+y\cdot cos\gamma}^{h}\right)=\overline{P_г\cdot cos\gamma\cdot sin\gamma}-\overline{P_г\cdot sin\gamma\cdot cos\gamma}-N\cdot\dfrac{sin\gamma}{tg\beta}+ \\ +N\cdot cos\gamma-P_{gd}\cdot\left(\overbrace{sin^2\gamma+cos^2\gamma}^{1}\right)-\overline{\overline{P_t\cdot cos\gamma\cdot sin\gamma}}+\overline{\overline{P_t\cdot cos\gamma\cdot sin\gamma}}- \\ -F_{kp}\cdot\left(\overbrace{sin^2\gamma+cos^2\gamma}^{1}\right) \\ I_0\dfrac{d^2}{dt^2}\gamma=-P_{gd}\cdot L_j+N\cdot L_j\cdot cos\gamma-N\cdot\dfrac{L_y}{tg\beta}+F_{kp}\cdot L_k+P_t\cdot\dfrac{D}{2}-M_0 \end{cases} \tag{2.49}$$

Або після всіх спрощувань матимемо

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2}{dt^2}h=-P_{gd}+N\left(cos\gamma+\dfrac{sin\gamma}{tg\beta}\right)-F_{kp} \\ I_0\dfrac{d^2}{dt^2}\gamma=-P_{gd}\cdot L_j+N\cdot L_j\cdot cos\gamma-N\cdot\dfrac{L_y}{tg\beta}+F_{kp}\cdot L_k+P_t\cdot\dfrac{D}{2}-M_0 \end{cases} \tag{2.50}$$

Зважаючи на те, що за основний діагностичний параметр нами прийнята фаза виникнення віброакустичного посилання, систему рівнянь (2.50) перепишемо використовуючи перехід до нової змінної. Маємо:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}h = \omega \cdot \frac{d}{d\varphi}h \\ \frac{d}{dt}\gamma = \omega \cdot \frac{d}{d\varphi}\gamma. \end{cases} \tag{2.51}$$

І відповідно:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2}h = \omega^2 \cdot \frac{d^2}{d\varphi^2}h \\ \frac{d^2}{dt^2}\gamma = \omega^2 \cdot \frac{d^2}{d\varphi^2}\gamma. \end{cases} \tag{2.52}$$

Тоді, враховуючи прийняті перетворення, в закінченому вигляді система диференційних рівнянь, які описують радіальне переміщення поршня в зазорі, матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{d\varphi^2}h = \frac{1}{m \cdot \omega^2} \cdot \left[-P_{gd} + N\left(cos\,\gamma + \frac{sin\,\gamma}{tg\beta} \right) - F_{kp} \right] \\ \frac{d^2}{dt^2}\gamma = \frac{1}{I_0 \cdot \omega^2} \cdot \left[-P_{gd} \cdot L_j + N \cdot L_j \cdot cos\,\gamma - N \cdot \frac{L_y}{tg\beta} + F_{kp} \cdot L_k \right. \\ \left. + P_t \cdot \frac{D}{2} - M_0 \right] \end{cases} \tag{2.53}$$

Майже всі попередні дослідники, зокрема Аллілуєв В.А., Ждановський М.С., Павлов Б.В., Бухтіяров І.Д. та інші при визначенні залежності амплітуди чи фази удару від зазору обходили питання визначення деяких сил тертя (їх значення в кращому випадку приймалося незмінним, а в гіршому зовсім не враховувалося) та гідродинамічного тиску в шарі оливи.

Без врахування зазначених сил математична модель буде не повною. Адже ці сили при певних умовах (невеликий зазор) можуть значно вплинути на кінцевий результат розрахунку показників фази.

Для визначення гідродинамічного тиску в шарі оливи розглянемо рух в’язкої рідини (шару оливи) між двома жорсткими пластинами, одна з яких нерухома (умовно гільза), а інша рухається у своїй площині із швидкістю v

(поршень). При цьому врахуємо, що між ними мається клиноподібний зазор, який звужується в напрямі руху і кут при вершині клину (кут атаки) рівний максимальному куту нахилу поршня – γ (рис. 2.11 *а*).

При умові існування між частинками рідини тільки сил тертя епюри швидкостей будуть трикутними (швидкості частинок рідини на пластинці 1 рівні v) і, звісно при цьому порушується умова сталості витрати. Тому можна припустити, що в зазорі виникають додаткові течії (показані стрілками на рис. 2.11 *а*), які зменшують витрату рідини у вхідному перерізі і збільшують його у вихідному. Такий рух рідини може існувати тільки під дією надлишкового тиску в центральній частині клинового зазору, який і проштовхує рідину через зазор. Надлишковий тиск створює гідродинамічну реакцію, яка перешкоджає зближенню поршня і гільзи. Таким чином “рідинний” клин є необхідною умовою виникнення гідродинамічного тиску.

Для нашого розрахунку будемо вважати, що рух поршня є сталим (швидкість руху $v = const$), оливу вважатимемо нестисливою (густина оливи $\rho = const$) і її динамічна в’язкість не залежить від тиску.

Розглянемо випадок ізотермічного і ламінарного (при якому можливі стаціонарні траєкторії рідини) руху оливи, приймаючи що швидкості руху її часточок на поверхнях контакту з поршнем і гільзою рівні швидкостям цих поверхонь ($v_1 = v$; $v_2 = 0$).

Враховуючи такі припущення в шарі оливи під поршнем, що рухається виникає гідродинамічний тиск $P_{гд}$, залежність якого від товщини шару оливи і швидкості поршня виражається рівнянням Рейнольдса [52,116]:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{h^3}{\mu}\cdot\frac{dp}{dx}\right)+\frac{d}{dz}\left(\frac{h^3}{\mu}\cdot\frac{dp}{dz}\right)=6v_\tau\frac{d}{dx}h+v_n, \qquad (2.54)$$

де h – товщина шару оливи в перерізі $\boldsymbol{x}$;

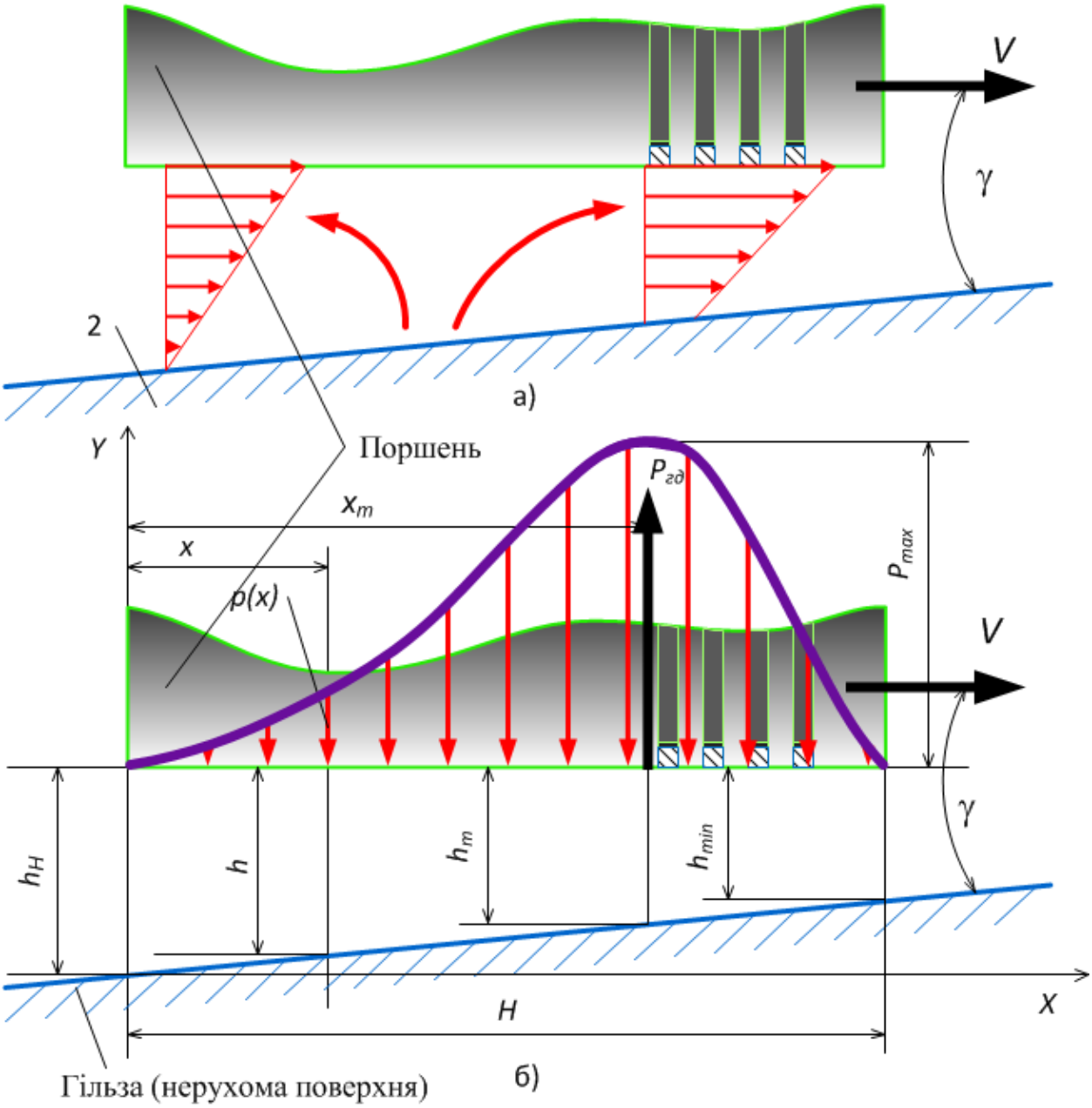


Рис.2. Схема для розрахунку гідродинамічного тиску $P_{гд}$

а)епюри швидкостей;

б)реальна розрахункова схема "рідинного" клину.

v_τ, v_n – відповідно значення дотичної і нормальної складових вектора швидкості точок на поверхні поршня; вісь $\boldsymbol{z}$ направлена перпендикулярно схемі.

Для нашої схеми поршня основна зміна тиску проходить по його довжині і тому можна знехтувати торцевим витіканням (тобто другою складовою рівняння 2.54). Вважаючи, що $v_\tau = v$ і $v_n = 0$, будемо мати:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{h^3}{\mu}\cdot\frac{dp}{dx}\right) = 6\cdot v\cdot\frac{d}{dx}h, \qquad (2.55)$$

Рішення рівняння (2.55) визначається граничними умовами і прийнятим законом зміни товщини масляної плівки. Знайдемо інтеграл цього рівняння:

$$\frac{h^3(x)}{\mu}\cdot\frac{d}{dx}p = 6vh(x) + C_1, \qquad (2.56)$$

де C_1 –постійна інтегрування.

Значення постійної найбільш просто можна визначити із умови, що в деякому перерізі $x = x_m$ товщина шару $h(x_m) = h_m$, надлишковий тиск $p(x_m) = p_{max}$ і, отже , $\frac{d}{dx}p = 0$. Звідси $C_1 = -6\mu v h_m$.

Або підставивши значення C_1 в рівняння (2.56) знайдемо:

$$\frac{d}{dx}p = \frac{6\mu v}{\gamma^2}\cdot\frac{h(x) - h_m}{h^3(x)}, \qquad (2.57)$$

Звичайно положення x_m заздалегідь невідомо. В цьому випадку, повторно інтегруючи в межах від 0 до x рівняння (2.57) і враховуючи звичайні граничні умови $p(0) = 0$ і $p(L_ю) = 0$, нескладно знайти значення довільних постійних інтегрування.

Тоді сумарну силу від тиску в шарі оливи з врахуванням поправки Гюмбеля на кінцеву довжину поршня отримаємо у вигляді:

$$P_{гд} = \frac{6 \cdot D^1 \cdot \mu \cdot \nu}{\gamma^2 \cdot \left(D^0 + L_ю\right)} \cdot \left(ln \frac{L_ю + \frac{h}{\gamma}}{\frac{h}{\gamma}} - \frac{2 \cdot L_ю}{L_ю + 2 \cdot \frac{h}{\gamma}} \right), \qquad (2.58)$$

де μ – динамічна в'язкість оливи;

D^0 – діаметр юбки поршня;

D^1 – діаметр гільзи циліндра;

v – швидкість поршня;

$L_ю$ – довжина юбки поршня.

Аналізуючи дану формулу можна відмітити суттєву залежність гідродинамічного тиску від швидкісного режиму роботи двигуна (ω). Також на нього значно впливає температурний режим. З підвищенням температури зменшує своє значення динамічна в'язкість оливи μ, що в свою чергу призводить до зниження $P_{гд}$. В загальному ж гідродинамічний тиск в шарі оливи можливий за обставин наявності кута нахилу (клину оливи) поршня γ.

Для визначення сили тертя юбки поршня об гільзу скористаємося виразом закону тертя Ньютона [116]. Зокрема:

$$\tau_x = \mu \cdot \frac{d}{dx} v_y, \qquad (2.59)$$

Для нашого випадку вираз матиме вигляд:

$$\tau_x = \mu \cdot \left(\frac{h}{2\mu} \cdot \frac{d}{dx} p(x) + \frac{v(x)}{h} \right), \qquad (2.60)$$

Інтегруючи вираз (2.59) та приймаючи до уваги значення (2.60) з врахуванням поправки Гюмбеля на кінцеву довжину поршня, отримаємо вираз для визначення сили тертя юбки поршня об гільзу в такому вигляді:

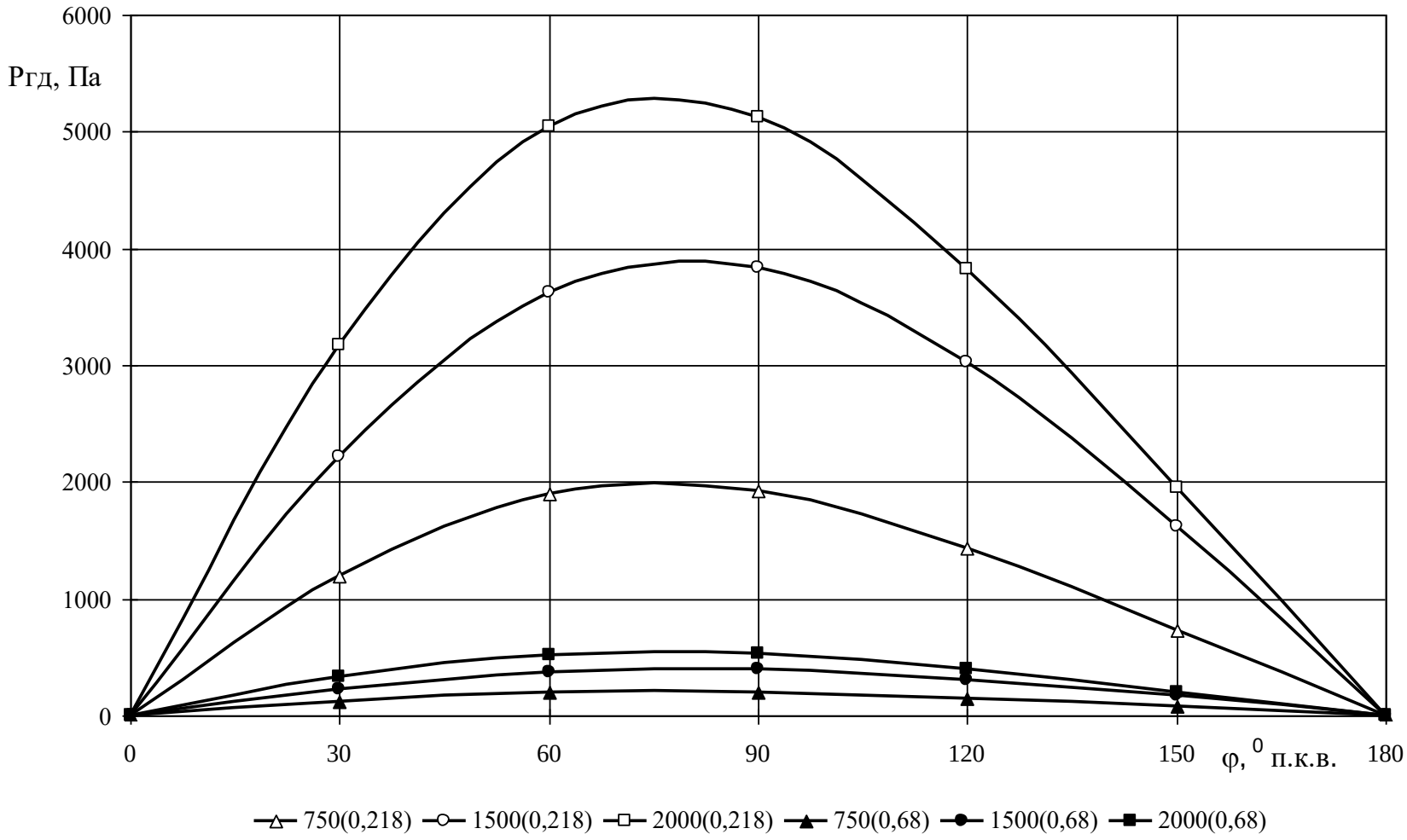


Рис.2.12 а. Зміна гідродинамічного тиску в шарі масла Ргд від кута повороту колінчастого валу φ для двигуна СМД-31А на швидкісних режимах 750, 1500 та 2000 хв$^{-1}$ при зазорах в ЦПГ : 1 - 0,218 мм; 2 - 0,68 мм.

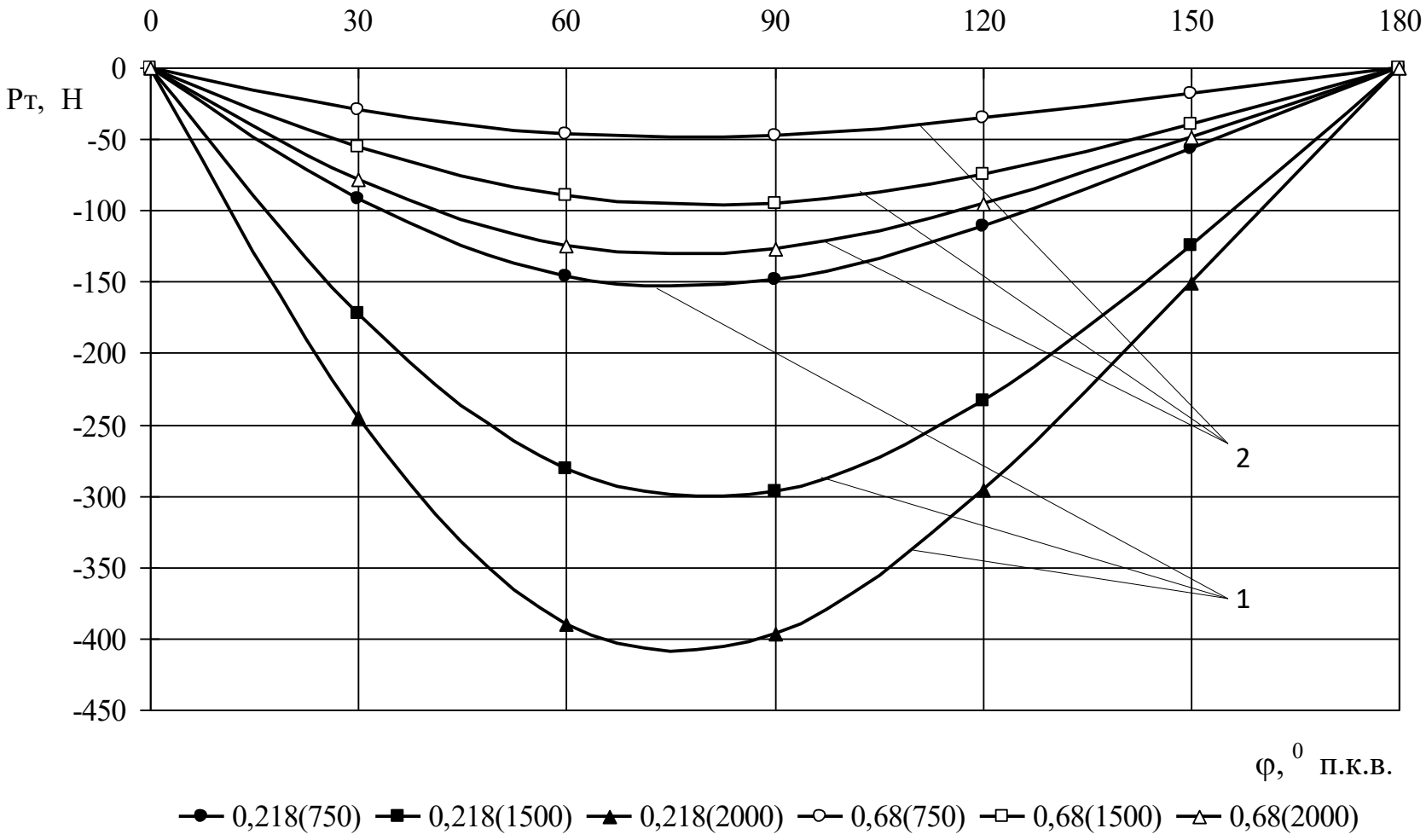


Рис.2.12 б. Зміна сили тертя твірної поршня об гільзу Рт від кута повороту колінчастого валу φ для двигуна СМД-31А на швидкісних режимах 750, 1500 та 2000 хв$^{-1}$ при зазорах в ЦПГ: 1 - 0,218 мм; 2 - 0,68 мм.

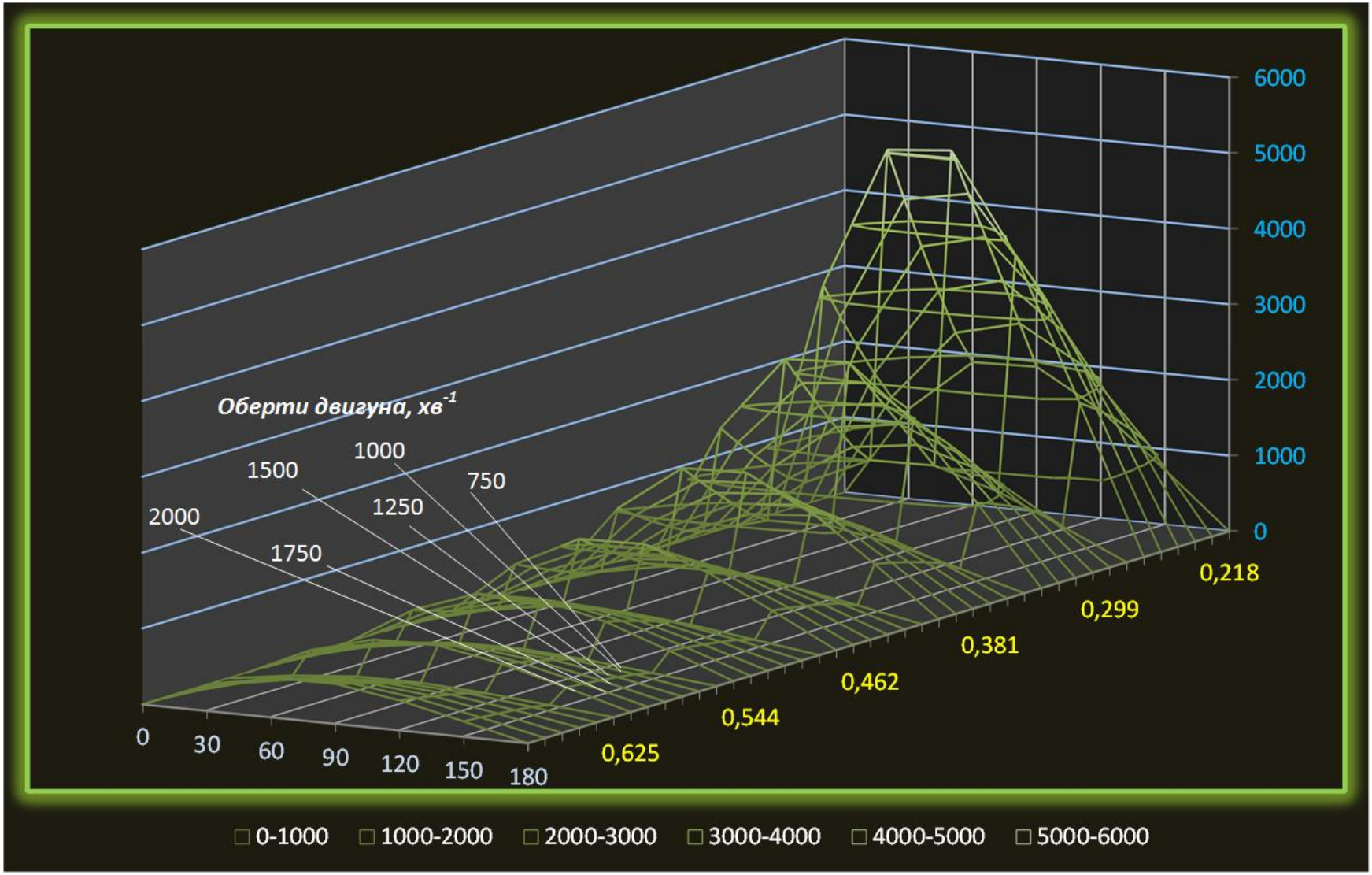


Рис. 2.13. Поверхня відгуку гідродинамічного тиску від зазору в ЦПГ, швидкісного режиму роботи двигуна (ω) та кута повороту колінчатого валу

$$P_m = \frac{4D\mu v}{\gamma}\left[2\,lg\left(\frac{L_ю + \frac{h}{\gamma}}{\frac{h}{\gamma}}\right) - \frac{3L_ю}{L_ю + 2\frac{h}{\gamma}}\right]\cdot\sqrt{\frac{4L_ю + D}{D}}, \qquad (2.61)$$

На рис.2.12, 2.13 приведені залежності гідродинамічного тиску та сили тертя поршня об гільзу розраховані за залежностями (2.58, 2.61). Характеристики цих двох сил взаємно протилежні. Врахування ж останніх в математичній моделі визначення фази виникнення віброакустичних посилань від перекладки поршня дозволить збільшити відповідність теоретичних положень експериментальним.

2.2. Залежність ширини спектру віброакустичного сигналу від тривалості співударяння

Рухомі деталі машин в місцях контакту один з одним генерують коливання і звуки. При цьому поверхня любих деталей не може бути абсолютно рівною і гладкою. Шорсткість поверхні і є однією з причин виникнення вібрацій при вузькому локальному контакті двох тертьових поверхонь, які взаємно переміщаються. Тут може бути сухе тертя ковзання чи кочення, а також гідродинамічне тертя, коли тертьові поверхні розділені шаром оливи, чи іншої змащувальної рідини.

Механічним ударом прийнято називати явище, яке виникає при зіткненні двох тіл і при цьому супроводжується повним або частковим переходом кінетичної енергії тіл в енергію деформації [1]. Компонентами удару є сила та переміщення. Характер же наслідків в значній мірі залежить від умов формування удару в даній кінематичній парі і визначається жорсткістю тіл, які співударяються. Навантаження ж можуть перевищувати розрахункові в 10, 100 і навіть тисячу разів, а механізми при цьому значно швидше зношуються [1]. Баланс енергії, який відповідає положенням класичної механіки (тіла після удару можуть володіти тільки двома видами енергії – кінетичною і енергією пластичних деформацій, якщо вони мають місце) наведено в таблиці 2.1.

Аналізуючи вирази балансу енергії при ударі (табл. 2.1), можна зробити висновок, що основною відмінністю сучасних уявлень стосовно енергетичного балансу при ударі, на відміну від класичної механіки, є уявлення існування в тілі після удару поряд з кінетичною також потенціальної енергії, в той час класична теорія не враховує таку можливість.

Одночасне існування в тілі потенціальної і кінетичної енергії після удару стає можливим завдяки тому, що напруження і деформації від місця контакту поширюються по тілу не миттєво, а з деякою кінцевою швидкістю – швидкістю розповсюдження хвилі. В зв'язку з цим та частина тіла яка вже охоплена хвилею напруження, має потенціальну енергію, а та частина, якої хвиля напруження ще не досягла, зберігає початкову кінетичну енергію.

Таблиця 2.1

Закономірності балансу енергії при ударі

Класична теорія удару				
Характер ударної взаємодії	Коефіцієнт відновлення	До удару	Під час удару	Після удару
Пружний	k=1	A_0	A_k+A_p	A_1
Пружно – пластичний (не зовсім пружний)	0<k<1	A_0	$A_k+A_p+П$	$A_1+П$
Пластичний	k=0	A_0	$A_k+A_p+П$	$A_1+П$
Сучасне уявлення теорії удару				
Характер ударної взаємодії	До удару	Під час удару	Після удару	
Пружний	A_0	A_k+A_p	A_1	
Пружний	A_0	A_k+A_p	A_1+A_{1p}	
Пружно – пластичний	A_0	$A_k+A_p+П$	$A_1+A_{1p}+П$	
Пружний	A_0	A_k+A_p	A_1+A_{1p}	
Пластичний	A_0	$A_k+П$	$A_1+П$	

В даній таблиці прийняті такі умовні позначення:

A_0 – сумарна кінетична енергія тіл перед ударом;

A_k – сумарна кінетична енергія тіл під час удару;

A_p – сумарна потенційна енергія тіл під час удару;

$П$ – енергія, яка затрачається на пластичні деформації і немеханічні втрати енергії;

A_1, A_{1p} – відповідно сумарні кінетична і потенційна енергії тіл після удару.

Подібним чином до моменту закінчення удару, коли ударне навантаження знімається, частина тіла не встигає звільнитися від навантаження, отже і від потенціальної енергії. Ця частина потенціальної енергії, яка залишається в тілі після удару A_{1p} і обумовлює наступний вираз балансу енергії для дійсного пружного удару [1]:

$$A_0 = A_1 + A_{1p}, \tag{2.62}$$

замість

$$A_0 = A_1, \tag{2.63}$$

прийнятого в класичній механіці.

Іншим розходженням у формулах класичної теорії удару є відсутність показника часу. Крім того, за допомогою цих формул неможливо розрахувати силу удару, напруження в тілах, які співударяються, їх переміщення та прискорення. Для визначення ж оптимального частотного діагностичного діапазону необхідно мати значення величини тривалості співудару поршня об гільзу. Тому визначення цих параметрів можливе при умові комбінування методів класичної механіки удару з елементами теорії пружності.

2.2.1. Визначення тривалості співудару поршня об гільзу

Уяву ударного руху зазвичай пов’язують з одноразовою взаємодією тіл, яка супроводжується вивільненням значної кількості енергії в малому просторі [18,85]. При цьому вважають, що найменший період власних коливань рівний або більший тривалості ударної взаємодії. Однак такий підхід в деякій мірі звужує можливість загального аналізу і перешкоджає використанню для цієї мети єдиних співвідношень, оскільки поняття короткочасний є умовним. Тому ми в даній роботі будемо розуміти під ударною взаємодією всякий

неперіодичний детермінований процес з чітко вираженим початком. При цьому мається на увазі, що до початку ударного процесу, тобто при $t \leq 0$, фізична величина що характеризує рух рівна нулю або може бути прирівняна нулю за рахунок відповідного переносу системи координат. В противному випадку рух слід розглядати, як імпульсну вібрацію, в якій дані методи не можуть бути використані.

До ударного руху відносяться і періодичні процеси імпульсного характеру в тому випадку, коли до моменту виникнення наступного імпульсу система, на яку діє удар, повертається в початковий стан.

Хвильову ж швидкість визначають тільки властивості матеріалу тіл, які приймають участь в ударі. При цьому остання на декілька порядків перевищує швидкість зміщення частинок цих тіл. Також відрізняються і частоти хвильових коливань від частот коливання частинок тіл: поздовжніх, крутильних і інших.

При розгляді питань віброакустичного діагностування ми стикаємося з явищем розповсюдження хвиль напружень при ударах в кінематичних парах і при цьому доводиться враховувати закономірності обміну енергією при співударі деталей. Час удару при цьому грає важливу роль. За час удару приймається час, протягом якого зберігається напруження в місці контакту деталей.

За природну одиницю часу, що вимірює тривалість удару, приймається період найбільш повільних коливань тіла.

Час удару мало залежить від початкової швидкості тіла і росте із збільшенням мас тіл, які співударяються і податливості (пластичності) місця контакту.

Залежність, яка представляє відоме рішення контактної задачі теорії пружності (формула Герца) [1] має вигляд:

$$F_y = k_1 \cdot \alpha^{\frac{3}{2}}, \qquad (2.64)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності;

α – величина стиснення (зближення).

В нашому випадку, коли контактують дві півсфери (поршень і циліндр) з масами M_1 і M_2 з початковою швидкістю v_0, то:

$$k_1 = \frac{4}{3 \cdot \left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right] \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}, \qquad (2.65)$$

μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуассона;

E_1, E_2 –модулі пружності матеріалу тіл;

R_1, R_2 – радіуси заокруглення місць контакту торцевих поверхонь.

В процесі виготовлення, відновлення, зборки та спрацювання деталей форма поверхонь, які контактують може відрізнятися від заданої. За рахунок послаблення посадок і збільшення зазорів деталі в відносному русі отримують додаткові ступені свободи і їх контактування проходить в декількох точках (подвійний удар). Характер імпульсу і його спектр при цьому змінюється [85].

Основні види коливальних рухів при роботі машини, які викликаються тертям ковзання, гідравлічними коливаннями в змащувальній, паливній, гідравлічній та охолоджувальній системах двигуна, супроводжуються шумами імпульсного, ударного характеру, викликаного перекладкою деталей в зазорах прецесією, а також за рахунок появи додаткових ступенів свободи після спрацювання.

При ударі стержньових систем має місце геометрична дисперсія сутністю якої є залежність фазової швидкості розповсюдження хвилі $a_ф$ від довжини λ_1, що значить зниження швидкості розповсюдження коливань з більшою частотою (високочастотні гармоніки). В результаті по мірі проходження вздовж стержня імпульси малої тривалості при кінці розширяються.

Якщо довжина хвилі $\lambda_1 = a_n \cdot t_{ud} < 2L$,

де L – довжина стержня;

a_n – швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль;

t_{ud} – тривалість удару.

то крива зміщення торців стержня має ступеневий характер, а крива прискорення вигляд серії затухаючих імпульсів. Якщо $t_{ud} > 2L/a_n$, то окремі імпульси зливаються в періодичний сигнал складної форми. Мінімальна тривалість сигналу, який можна розрізнити визначається залежністю:

$$t_{min} \approx 6.9 \cdot \frac{r_1}{a_n} + 0.014 \cdot \frac{L}{a_n}, \qquad (2.66)$$

де r_1 – радіус стержня;

Для циліндричних поверхонь, у яких зоною контакту є лінія, зближення визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \cdot ln \frac{4}{b_k} \cdot \frac{F_y}{L}, \qquad (2.67)$$

де b_k – ширина площадки контакту.

Для випукло–ввігнутої поверхні, якою є гільза і поршень ширина контактної площадки b_k визначається залежністю:

$$b_k = 2\sqrt{\frac{F_y}{2.71 \cdot L} \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2}}, \qquad (2.68)$$

При цьому частина кінетичної енергії тіла, яке співударяється, переходить в потенціальну енергію пружного стиснення A_p [1].

$$A_p = \int_0^{\alpha_{max}} k_1 \cdot \alpha^{\frac{3}{2}} d\alpha = \frac{2}{5} \cdot k_1 \alpha_{max}^{\frac{5}{2}}, \qquad (2.69)$$

Тоді максимальне стиснення тіл знайдемо за залежністю:

$$\alpha_{max} = \left(\frac{5}{2} \cdot \frac{A_p}{k_1} \right)^{\frac{2}{5}} = \left[\frac{5}{2} \cdot \frac{v_0^2 \cdot M_1 \cdot M_2}{k_1 \cdot (M_1 + M_2)} \right]^{\frac{2}{5}}, \qquad (2.70)$$

І відповідно максимальна сила удару:

$$F_{y_{max}} = k_1 \cdot \alpha_{max}^{\frac{3}{2}} = \left[\frac{5}{2} \cdot \frac{k_1 \cdot v_0^{\,2} \cdot M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2} \right]^{\frac{3}{5}}, \qquad (2.71)$$

Залежність для визначення тривалості удару з врахуванням вищевикладеного матиме вигляд:

$$t_{ud} = \frac{2\sqrt{A_p}}{v_0} \cdot \int_0^{\alpha_{max}} \frac{d\alpha}{\sqrt{A_p - \int_0^{\alpha} k_1 \cdot \alpha^{\frac{3}{2}} d\alpha}} = \frac{2}{v_0} \cdot \int_0^{\alpha_{max}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - \frac{2}{5}\frac{k_1}{A_p}\alpha^{\frac{5}{2}}}}, \qquad (2.72)$$

Розділивши чисельник і знаменник отриманого виразу на α_{max} та ввівши при цьому допоміжну змінну $z = \alpha / \alpha_{max}$ і замінивши границі інтегрування отримаємо:

$$t_{ud} = 4.2 \cdot \left(\frac{M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2) \cdot k_1} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \frac{1}{v_0^{\frac{1}{5}}}, \qquad (2.73)$$

Тривалість удару t_{ud} нас цікавить з точки зору його зв’язку з віброакустичним сигналом. Як відомо з літературних джерел [85,87], зміна часу удару двох тіл впливає на ширину спектру. Із зменшенням її, ширина спектру збільшується і навпаки. Як видно з формули (2.73) на тривалість удару суттєво впливають пружні властивості матеріалів тіл, радіуси заокруглення і маса деталей і зовсім несуттєво швидкість.

Для однотипних пар деталей можна прийняти незмінність пружних властивостей, тобто μ_i і E_i є const. Однак, якщо провести вимірювання віброакустичного сигналу після виробленням механізмом певного ресурсу, можна помітити зміни в сигналі. В результаті спрацювання змінюються радіуси заокруглення деталей, незначно маса, збільшуються зазори, а відповідно і шлях, який проходить деталь за той же проміжок часу та швидкість співудару. Все це призводить до зменшення тривалості удару, що і є одною із ознак зміни технічного стану пари.

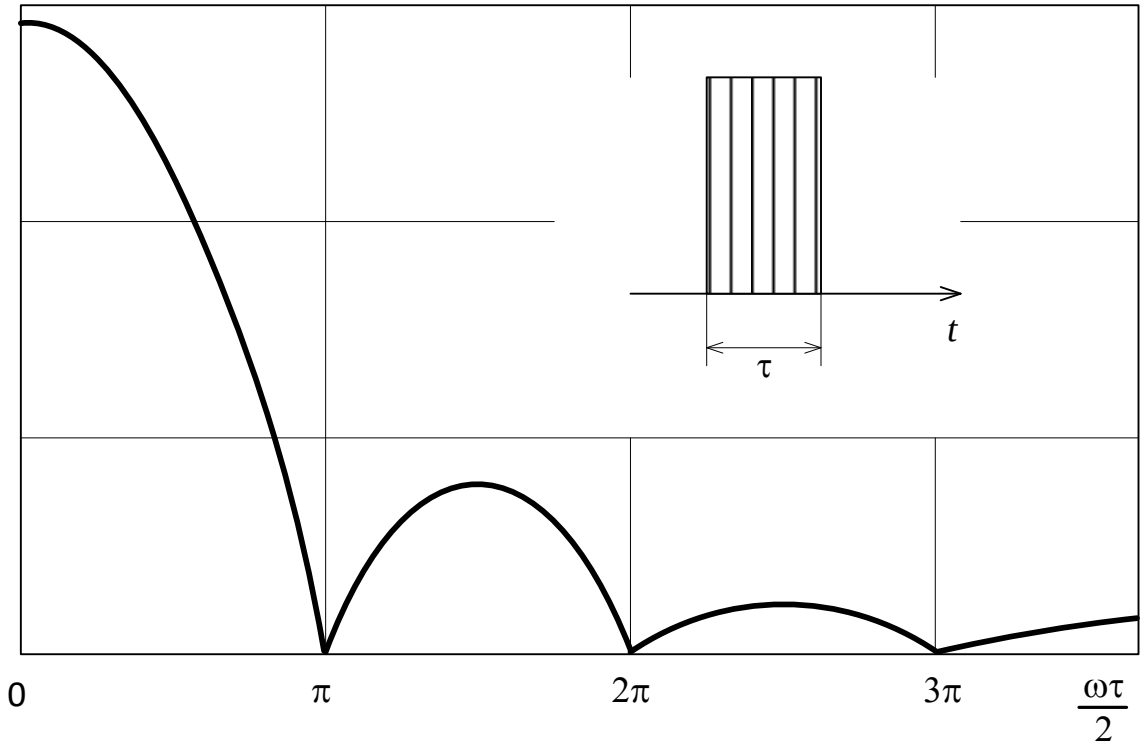
2.2.2. Вибір моделі акустичного імпульсу, та визначення ширини його спектру

При роботі з акустичним сигналом для вирішення ряду задач, пов’язаних з діагностуванням машин, виникає питання вибору моделі віброакустичного імпульсу, визначення ширини спектру та частоти квантування детектованного сигналу.

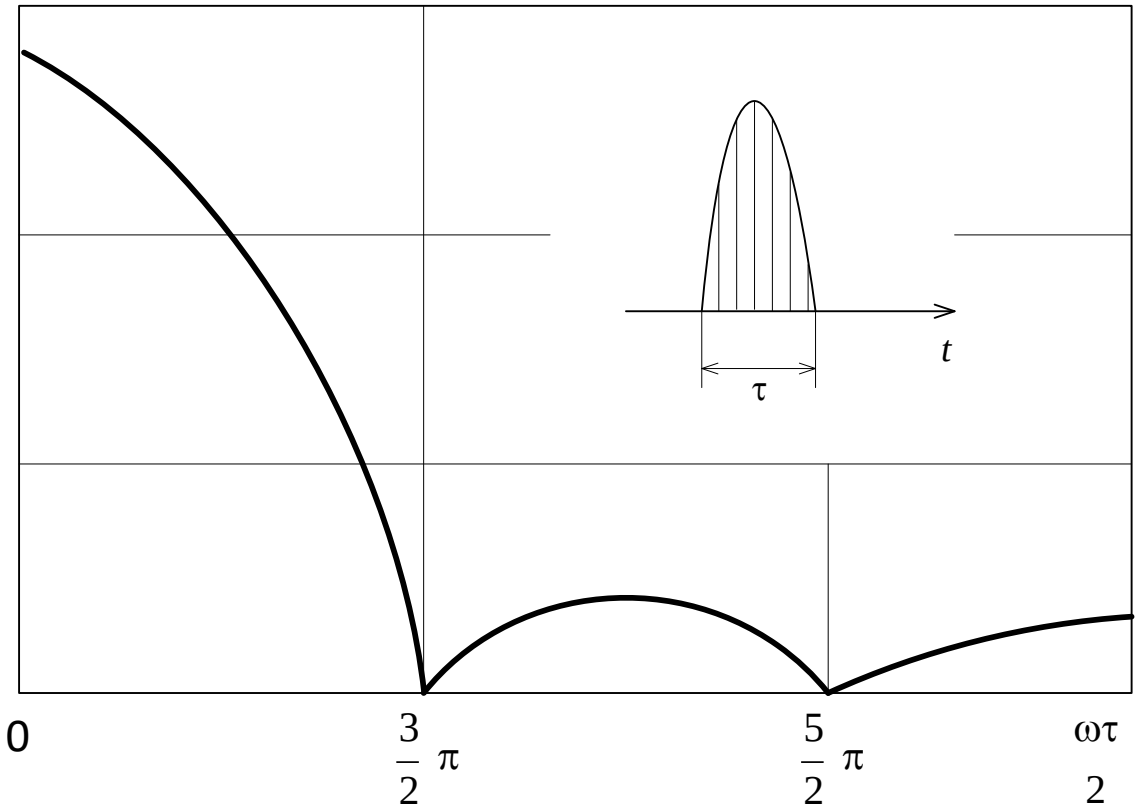
Поодинокий імпульс довільної форми має суцільний спектр, який може бути виражений постійною величиною, пропорційною площі імпульсу, в якому період залишається більшим в порівнянні з тривалістю імпульсу [110].

Для наближеного уявлення реальних віброакустичних сигналів часто використовують імпульси у формі прямокутника чи косинусоподібного імпульсу (рис.2.14) [97].

При виборі ж частоти квантування зазвичай виходять із ширини спектру сигналу і користуються теоремою Котельникова [110].



а)



б)

Рис.2.14. Спектри сигналів різної форми:
а) - прямокутного,
б) - косинусоподібного

Нами прийнятий дещо інший підхід до вибору частоти квантування, який базується на особливостях моделі акустичного імпульсу і його інформаційного змісту з позиції діагностування механізмів.

Звернувши увагу на модель віброакустичного імпульсу (рис.2.16) можна прийняти, що передній фронт імпульсу веде себе як зростаюча півхвиля синусоїди з деякою частотою F_i. Задній же фронт цього імпульсу розглядається, як затухаючий по експоненті. При цьому ми виходимо з того, що акустичний імпульс є сумою затухаючих синусоїд рис. 2.14 [30], а при детектуванні акустичного сигналу форма переднього фронту не зміниться рис.2.10., 2.15. Так як в спектрі недетектованого сигналу відсутні гармоніки, частота яких вище F_v , то повинна виконуватися умова:

$$F_i \le F_v, \tag{2.74}$$

де F_v – верхня границя спектру недетектованого сигналу.

Передній фронт імпульсу (рис.2.16) може бути записаний у вигляді [87]:

$$x(t) = \frac{1}{2}\left(1 - cos\,\Omega \cdot t\right), \tag{2.75}$$

Аналізуючи рисунок можна помітити, що в точці A ордината обгинальна сягає свого максимуму. Після неї іде повільний спад по синусоїді до точки B. Природно, що точка B є спільною для заднього фронту синусоїди і подальшої експоненти. Тому модель даного імпульсу матиме вигляд:

$$x(t) = \left| \begin{array}{l} \frac{1}{2}\left(1 - cos\,\Omega \cdot t\right) при\, 0 \le t \le t_1 \\ A_1 \cdot e^{-\delta_{імп} \cdot (t - t_1)} при\, t \ge t_1 \end{array} \right., \tag{2.76}$$

Визначимо абсцису t і ординату A_1 точки B. Для цього визначимо диференціали правих частин виразу (2.76) та прирівнявши їх при $t = t_1$, отримаємо:

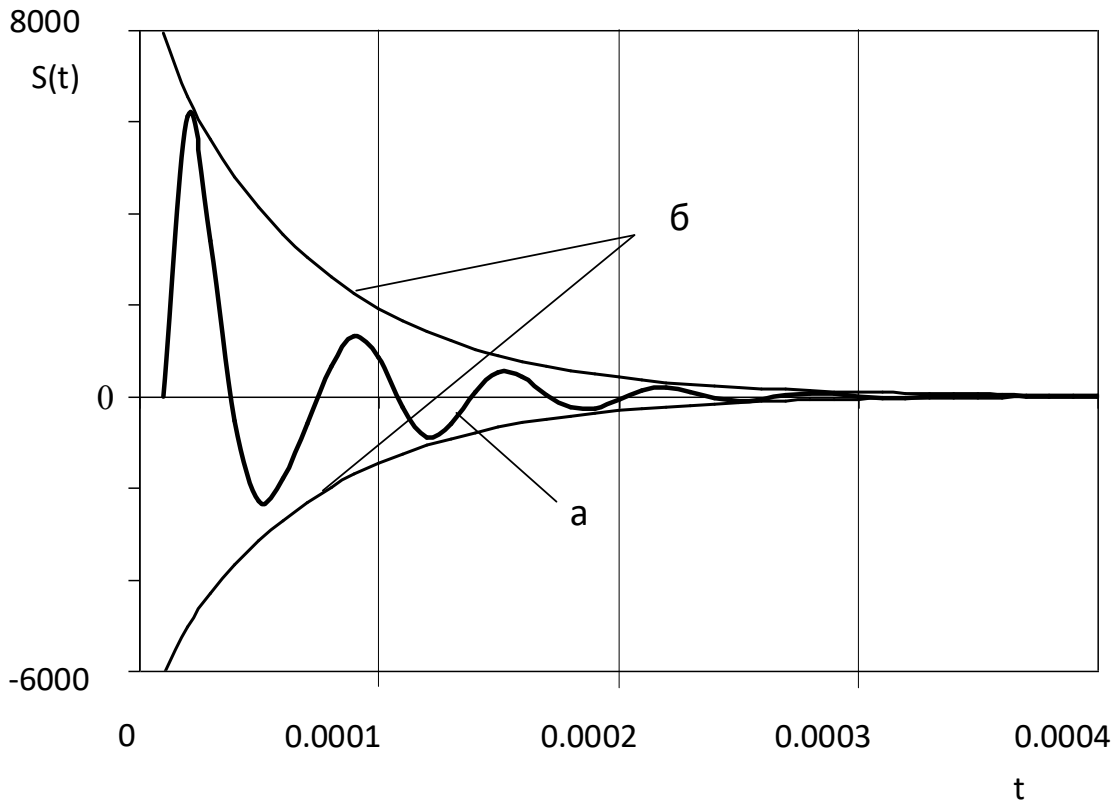


Рис.2.15. Елементарний акустичний імпульс - затухаюча синусоїда(а), огинаюча детектованого сигналу(б).

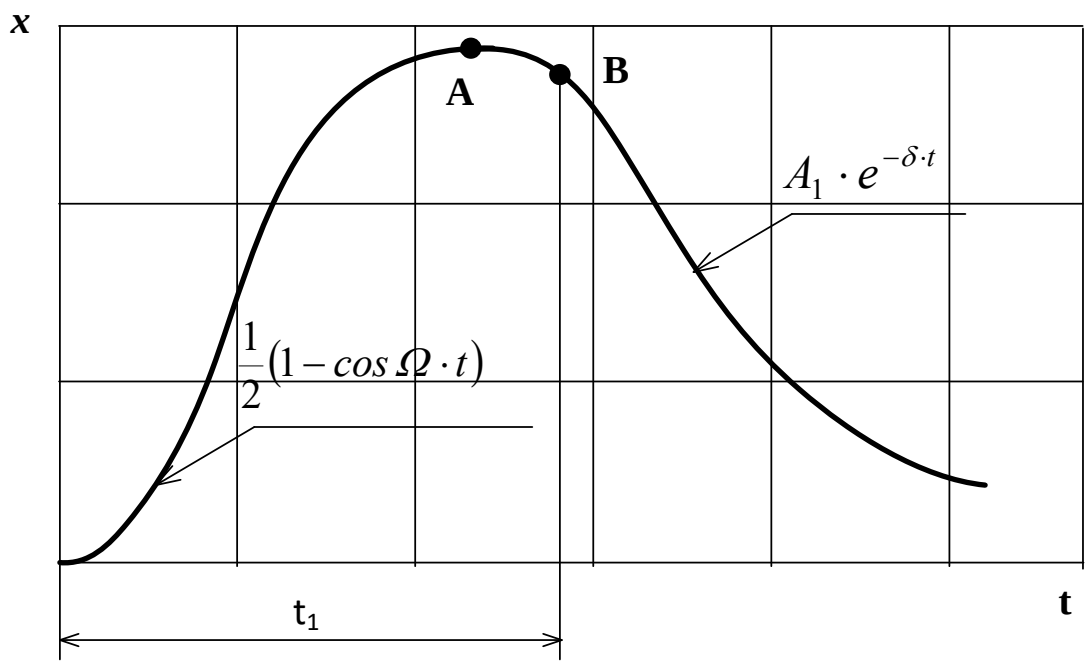


Рис.2.16. Модель реального акустичного імпульсу перекладки поршня в зазорі.

$$\frac{\Omega}{2} sin\,\Omega \cdot t_1 = -A_1 \cdot \delta \qquad (2.77)$$

При цьому величина A_1 пов'язана з t_1 наступним чином:

$$A_1 = \frac{1}{2}\left(1 - cos\,\Omega \cdot t_i\right), \qquad (2.78)$$

Після підстановки (2.78) в (2.77) та проведення деяких замін і спрощення прийдемо до рівняння визначення абсциси t_1, яке матиме вигляд:

$$t_1 = \frac{1}{\Omega} a\,cos\left(\frac{\delta_{імп}{}^2 - \Omega^2}{\delta_{імп}{}^2 + \Omega^2}\right), \qquad (2.79)$$

де Ω – кругова частота;

$\delta_{імп}$ – коефіцієнт затухання коливань імпульсу.

Враховуючи, що коефіцієнт затухання за величиною не перевищує 600 сек$^{-1}$ [85,95], а $\Omega \geq 2\pi \cdot 10^3$, перепишемо рівняння наступним чином:

$$t_1 \approx \frac{\pi}{\Omega}, \qquad (2.80)$$

тобто точка B практично співпадає з точкою A.

Це значить, що замість моделі (2.76) можна використати спрощену:

$$x(t) = \left| \begin{array}{l} \frac{1}{2}\left(1 - cos\,\Omega \cdot t\right) при\, 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\Omega} \\ e^{-\delta \cdot \left(t - \frac{\pi}{\Omega}\right)} при\, t > \frac{\pi}{\Omega} \end{array} \right., \qquad (2.81)$$

Аналізуючи дані моделі та рис.2.16 можна зробити ряд висновків:

- акустичний імпульс є результатом коливань елементарних осциляторів, які збуджуються одночасно одним ударом;
- частоти складових ω_i відповідають частотам власних коливань механізму;
- коефіцієнти затухання $\delta_{імп}$ характеризують швидкість розсіювання енергії коливання.

При цьому A_i складових визначається інтенсивністю удару, який викликав коливання. Параметри ω_i і δ_{imn} є константами для даного механізму і не змінюються при зміні його технічного стану.

Практично любий сигнал можна представити нескінченною сумою тригонометричних функцій [110]:

$$s(t) = s_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t \right), \qquad (2.82)$$

Відповідно спектр сигналу $s(t)$ визначається наступною системою інтегралів:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_i t) dt \\ b_i &= \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_i t) dt \end{aligned} \right\}, \qquad (2.83)$$

Згідно цим формулам, коефіцієнти a_i і b_i є скалярними похідними функції $s(t)$ на функції $\cos \omega_i \cdot t$ і $\sin \omega_i \cdot t$, тобто проекціями вектора $s(t)$ на координатні вісі, ординатами яких є зазначені тригонометричні функції.

Вираз (2.83) можна розглядати як коефіцієнти кореляції (в деякому масштабі) між функцією $s(t)$ і тригонометричними функціями частоти ω_i. Останнє якраз чітко розкриває фізичний зміст коефіцієнтів a_i і b_i.

При діагностуванні з’єднань і механізмів двигуна за приймач вібрації використовують п’єзоелектричні датчики прискорень, які перетворюють механічні коливання в електричний струм, тобто:

$$\ddot{x}(t) = A \cdot I(t), \qquad (2.84)$$

Потім спеціальною електронною апаратурою проводиться розклад складного коливання струму $I(t)$ на його складові.

Розклад складного коливання на його складові основане на теоремах Фур’є і носить назву спектрального аналізу [108,109,110].

Ряд Фур’є являє собою періодичну функцію, як суму періодичних складових і використовується для розкладу періодичних функцій з лінійним

спектром. Цей розклад може бути узагальненим і у випадку неперіодичної функції, що має суцільний спектр.

Використавши перетворення Фур'є для виразу (2.81) дозволить визначити спектр віброакустичного імпульсу. Дійсна і комплексна складові спектру визначаються у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} A(\omega_i) &= \int_0^{\frac{\pi}{\Omega}} \frac{1}{2}\left(1-cos(\Omega t)\right)cos(\omega_i t)dt + \int_{\frac{\pi}{\Omega}}^{\infty} e^{-\delta\left(t-\frac{\pi}{\Omega}\right)} cos(\omega_i t)dt \\ B(\omega_i) &= \int_0^{\frac{\pi}{\Omega}} \frac{1}{2}\left(1-cos(\Omega t)\right)sin(\omega_i t)dt + \int_{\frac{\pi}{\Omega}}^{\infty} e^{-\delta\left(t-\frac{\pi}{\Omega}\right)} sin(\omega_i t)dt \end{aligned}\right\}, \quad (2.82)$$

Після інтегрування у вказаних межах отримаємо:

$$\left.\begin{aligned} A(\omega_i) &= \left[\frac{1}{2\omega_i} - \frac{\omega_i}{2\left(\Omega^2-\omega_i^2\right)} - \frac{\omega_i}{\delta^2+\omega_i^2}\right] sin\left(\pi\frac{\omega_i}{\Omega}\right) + \\ &+ \frac{\delta_{імп}}{\left(\delta_{імп}^2+\omega_i^2\right)} cos\left(\pi\frac{\omega_i}{\Omega}\right) \\ B(\omega_i) &= \left[\frac{\omega_i}{2\left(\Omega^2-\omega_i^2\right)} + \frac{\omega_i}{\delta_{імп}^2+\omega_i^2} - \frac{1}{2\omega_i}\right] cos\left(\pi\frac{\omega_i}{\Omega}\right) + \\ &\frac{\delta_{імп}}{\left(\delta_{імп}^2+\omega_i^2\right)} sin\left(\pi\frac{\omega_i}{\Omega}\right) + \frac{1}{2\omega_i} + \frac{\omega_i}{2\left(\Omega^2-\omega_i^2\right)} \end{aligned}\right\}, \quad (2.83)$$

Використовуючи систему (2.83) можна визначити амплітудний спектр $AG(\omega_i)$ та спектр потужності $AG_1(\omega_i)$ акустичного сигналу користуючись виразами:

$$\left|\begin{aligned} AG(\omega_i) &= \sqrt{A(\omega_i)^2 + B(\omega_i)^2} \\ AG_1(\omega_i) &= A(\omega_i)^2 + B(\omega_i)^2 \end{aligned}\right., \quad (2.84)$$

Іноді значно зручніше користуватися логарифмами спектрів, які показують рівень сигналу у відносних величинах – дБ. Логарифмуючи (2.84) отримаємо:

$$\left| \begin{array}{l} G_1(\omega_i) = ln\left(\sqrt{A(\omega_i)^2 + B(\omega_i)^2}\right) \\ G_2(\omega_i) = ln\left(A(\omega_i)^2 + B(\omega_i)^2\right) \end{array} \right., \qquad (2.85)$$

Як видно з виразу (2.83), амплітудний спектр імпульсу (2.81) залежить від крутизни переднього фронту, який визначається круговою частотою Ω та від коефіцієнта затухання $\delta_{імп}$.

2.3. Непараметричний синтез методів прийняття рішення при діагностуванні ЦПГ

Виходячи із задачі визначення ступеню зношування з'єднання "поршень-гільза" за даними виміру ряду непрямих (побічних) параметрів спробуємо проаналізувати стан системи ЦПГ.

Стан системи описується множиною параметрів, які його визначають. Розпізнавання стану системи можливе за рахунок віднесення її до одного із всіх класів (діагнозів). Число діагнозів (класів, типових станів, еталонів) залежить від особливостей задачі і мети дослідження.

Стосовно віброакустичного діагностування ЦПГ найбільш інформаційними параметрами можуть виступати максимальна енергія віброударного посилання від перекладки поршня в зазорі x_1 та фаза його виникнення x_2 (рис 2.17 а). Найбільш просто адаптуються (трансфор-муються) на багатомірні системи методи мінімального ризику та метод найбільшої правдоподібності [13]. У випадках, коли в методі статистичного рішення потрібно визначити межі області прийняття рішення, розрахункова сторона задачі суттєво ускладнюється. Тому для спрощення розглянемо процес розпізнавання при наявності одного діагностичного параметру –x фази виникнення віброударного посилання (рис.2.17 б).

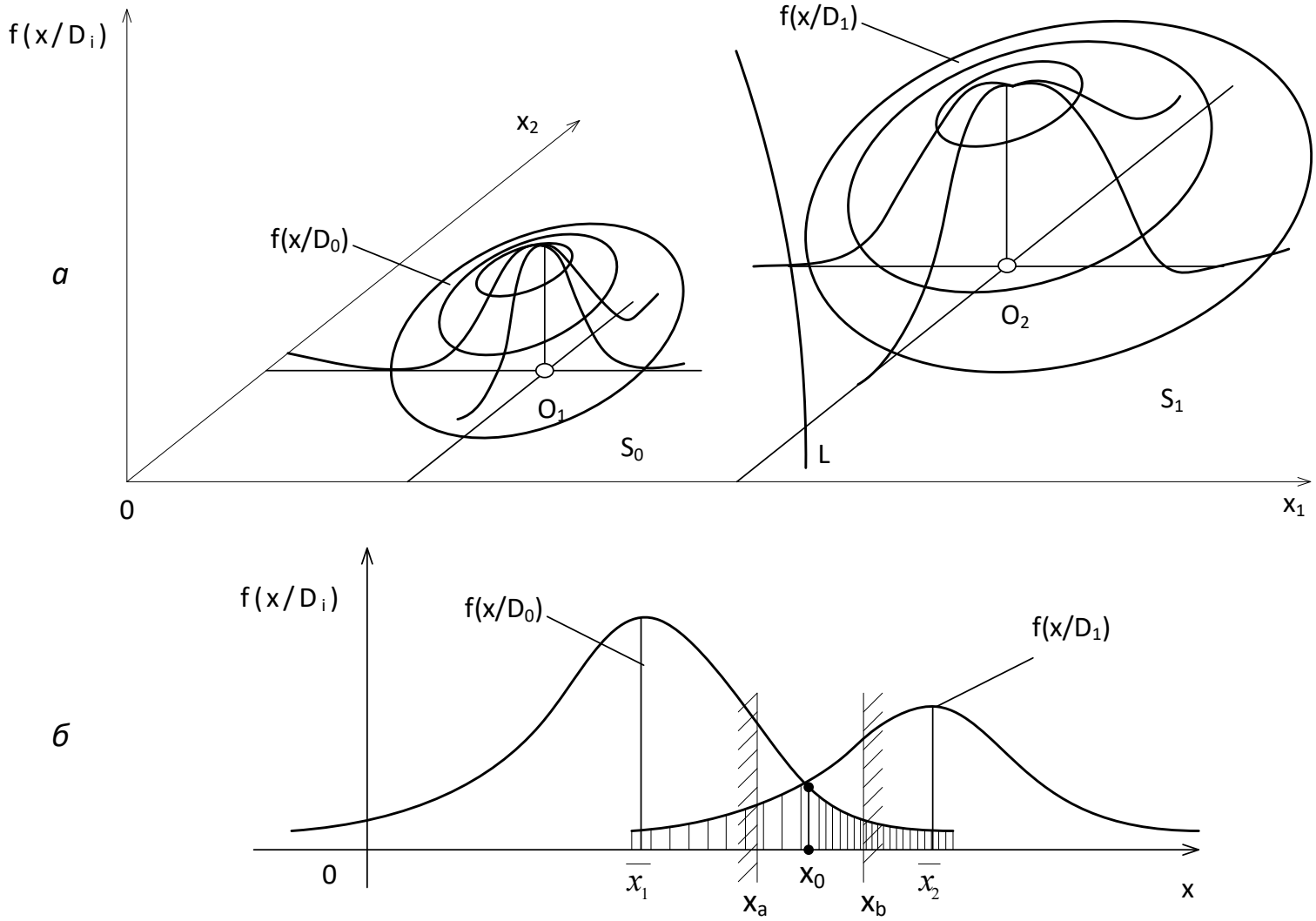


Рис.2.17. Схема статистичного розподілу D_0 -роботоздатного та D_1-нероботоздатного станів ЦПГ:

а - для двох діагностичних ознак.;

б - для однієї діагностичної ознаки.

Задача полягає у встановленні для з'єднання "поршень-гільза" одного з діагнозів "справне" чи "несправне". Сукупність послідовних дій у процесі розпізнавання називають алгоритмом розпізнавання [16]. Суттєвою частиною процесу розпізнавання є вибір параметрів роботи алгоритмів, які б повністю описували і виявляли зміну стану системи. Дані ж параметри повинні бути досить інформативними, щоб при вибраному числі діагнозів існувала можливість процесу розділення. Фактично ж стосовно даної задачі завдання полягає у виборі значення x_0 параметра x таким чином, що при $x > x_0$ слід приймати рішення про зняття двигуна з експлуатації, а при $x_0 < x$ продовжувати подальшу його експлуатацію.

Так як стан системи характеризується одним параметром, то система має одномірний простір (матрицю–вектор) ознак. Розділення проводиться на два класи (області стану). Умовимося вважати: D_0 – область справного стану і D_1 – область несправного стану. Тоді стан системи може бути описаний таким виразом:

при $$\begin{cases} x < x_0 & x \in D_0 \\ x > x_0 & x \in D_1 \end{cases}, \qquad (2.86)$$

Фаза виникнення віброударного посилання неоднозначно характеризує стан ЦПГ дизельного двигуна (нерівномірна подача палива, спрацювання газорозподільчого механізму тощо.). У залежності від зазначених факторів закон розподілу фази x відповідно для справного і несправного стану системи "циліндр-поршень" може мати вигляд показаний на рис.2.16 *б*. Суттєво те, що області справного і несправного (дефектного) станів пересікаються і тому в спільній зоні принципово неможливо вибрати значення x_0 , при якому правило (2.86) не давало б помилкових рішень.

Розглянемо для початку можливі помилки при прийнятті рішень стану системи.

Хибна тривога (помилка першого виду α) – випадок, коли приймається рішення про несправний стан системи, хоча в дійсності вона перебуває в справному стані, тобто замість D_0 приймається D_1.

Пропуск дефекту (помилка другого виду β) – прийняття рішення про справний стан, тоді як система є несправною (замість D_1 приймається D_0).

Вирішальне правило у відповідності з яким приймається рішення про діагноз за методом Баєса полягає у порівнянні ознаки x з рівнем розпізнавання P_i для діагнозу D. При цьому вірогідність найближчого конкуруючого діагнозу не вище $1–P_i$.

Для виявлення дійсного стану системи позначимо через $П_{i,j}$ (i=0,1; j=0,1) можливі рішення за правилом (2.86) (i–індекс прийнятого діагнозу, j – індекс дійсного стану). Тоді $П_{0,1}$ – пропуск дефекту, а $П_{1,0}$ – хибна тривога; $П_{0,0}$, $П_{1,1}$– правильні рішення.

Розглянемо вірогідність хибної тривоги $P(П_{1,0})$ при використанні правила (2.86). Площа під кривою щільності вірогідності справного стану , яка відповідає $x > x_0$, виражає умовну вірогідність ситуації $x > x_0$ для справної системи:

$$P(x > x_0 / D_0) = \int_{x_0}^{\infty} W\left(\vec{x} / D_0\right) dx \qquad (2.87)$$

Вірогідність хибної тривоги визначається, як добуток двох подій: наявність справного стану і значення $x > x_0$. Тоді

$$P(П_{1,0}) = P(D_0) \cdot P(x > x_0 / D_0) = P_0 \int_{x_0}^{\infty} W\left(\vec{x} / D_0\right) dx, \qquad (2.88)$$

де P_0 – апріорна вірогідність діагнозу D_0.

Подібним чином знаходимо вірогідність пропуску дефекту

$$P(П_{0,1}) = P(D_1) \cdot P(x < x_0 / D_0) = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} W\left(\vec{x} / D_1\right) dx, \qquad (2.89)$$

У більшості випадків при віброакустичному діагностуванню рішення про віднесення ознаки x діагностування до класу D_0 чи D_1 можна пов'язати з величиною відношення правдоподібності $L\left(\vec{x}\right)$ (відношення щільності вірогідності розподілу x при двох станах):

$$L\left(\vec{x}\right)=\frac{W\left(\vec{x}/D_1\right)}{W\left(\vec{x}/D_0\right)}, \qquad (2.90)$$

де $W\left(\vec{x}/D_0\right)$ – щільність вірогідності розподілу x при справному стані;

$W\left(\vec{x}/D_1\right)$ – щільність вірогідності розподілу x при несправному стані.

У відповідності з правилом (2.86) за методом мінімального ризику приймається наступне рішення про стан об'єкта, який має дане значення параметра x.

$$\begin{aligned} &x\in D_0 \quad \textit{якщо} \quad \frac{W\left(\vec{x}/D_1\right)}{W\left(\vec{x}/D_0\right)}\rangle\frac{\left(\Pi_{0,1}-\Pi_{1,1}\right)\cdot P_1}{\left(\Pi_{1,0}-\Pi_{0,0}\right)\cdot P_0} \\ &x\in D_1 \quad \textit{якщо} \quad \frac{W\left(\vec{x}/D_1\right)}{W\left(\vec{x}/D_0\right)}\langle\frac{\left(\Pi_{0,1}-\Pi_{1,1}\right)\cdot P_1}{\left(\Pi_{1,0}-\Pi_{0,0}\right)\cdot P_0} \end{aligned}, \qquad (2.91)$$

де $\frac{\left(\Pi_{0,1}-\Pi_{1,1}\right)\cdot P_1}{\left(\Pi_{1,0}-\Pi_{0,0}\right)\cdot P_0}$ – заздалегідь вибраний рівень розпізнавання (зазвичай ≥0,9).

Таким чином, використовуючи залежності (2.90, 2.91) для прийняття рішення не потрібне визначення значення параметру x_0.

Відношення правдоподібності несе всю статистичну інформацію, яка міститься в векторі діагностичних ознак. Хоча на практиці буває дещо зручніше розглядати не відношення правдоподібності, а логарифм цього відношення. Це не змінює результату, так як логарифмічна функція монотонно зростає разом із своїм аргументом, але для нормального і деяких інших законів розподілу використання логарифму відношення правдоподібності є дещо простішим.

Тоді:

$$\begin{aligned} &x \in D_0 \quad \textit{якщо} \quad \ln L\left(\vec{x}\right) \rangle \ln\left[\frac{\left(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}\right)\cdot P_1}{\left(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}\right)\cdot P_0}\right] \\ &x \in D_1 \quad \textit{якщо} \quad \ln L\left(\vec{x}\right) \langle \ln\left[\frac{\left(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}\right)\cdot P_1}{\left(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}\right)\cdot P_0}\right] \end{aligned}, \qquad (2.92)$$

Слід також зважати на те, що оцінки вартості помилок першого α та другого виду β часто бувають невідомі, а їх достовірне визначення пов’язане із значним ускладненням. Тому бажано завжди при певному рівні однієї із помилок (частіше першого виду) мінімізувати значення іншої. В практиці для попередніх розрахунків значення цих помилок приймають $\alpha = \beta = 0.05$. Після прийняття рішення про стан системи відповідні значення помилок потребують уточнення. Для цього використовуються залежності:

$$\left| \begin{aligned} \alpha &= \frac{N_{\Pi_{1,0}}}{N_{\Pi_{0,0}} + N_{\Pi_{1,0}}} \\ \beta &= \frac{N_{\Pi_{0,1}}}{N_{\Pi_{1,1}} + N_{\Pi_{0,1}}} \end{aligned} \right. , \qquad (2.93)$$

де $N_{\Pi_{1,0}}$, $N_{\Pi_{0,1}}$ – кількість неправильних рішень відповідно для справного і несправного станів системи;

$N_{\Pi_{0,0}}$, $N_{\Pi_{1,1}}$ – кількість правильних рішень відповідно для справного і несправного станів.

Хоча метод Баєса займає особливе місце серед методів технічної діагностики, йому притаманні деякі недоліки: великий об'єм попередньої інформації, "пригнічення" діагнозів, які рідко зустрічаються та наявність одного рівня порівняння, що в решті решт створює перешкоди при використання, при наявності спільної зони законів розподілу діагностичної ознаки x для справного і несправного станів.

Тому для двохкласової задачі розпізнання оптимальним є послідовний метод, який визначається наступними нерівностями:

При прийнятті рішення D_0

$$\begin{cases} ln\,C_0 < ln\,L(x_1 \ldots x_{n-1}) < ln\,C_1 \\ ln\,C_0 \geq ln\,L(x_1 \ldots x_n) \end{cases}, \qquad (2.94)$$

При прийнятті рішення D_1

$$\begin{cases} ln\,C_0 < ln\,L(x_1 \ldots x_{n-1}) < ln\,C_1 \\ ln\,L(x_1 \ldots x_n) \geq ln\,C_1 \end{cases}, \qquad (2.95)$$

де C_0 і C_1 – пороги відповідно для справного і несправного станів.

Пороги C_0 і C_1 визначаються за формулами:

$$C_1 = \frac{1-\beta_{зад}}{\alpha_{зад}} \qquad C_0 = \frac{\beta_{зад}}{1-\alpha_{зад}} \qquad (2.96)$$

де $\alpha_{зад}$ і $\beta_{зад}$ – відповідно задані вірогідності помилок першого та другого виду.

В даному випадку, коли потрібна висока надійність розпізнавання, доцільно ввести зону невизначеності (зону відмови від розпізнавання). Правило прийняття рішення в цьому випадку буде мати вигляд (рис.2.16 б):

$$\left| \begin{array}{lll} при & x < x_a & x \in D_0 \\ при & x > x_b & x \in D_1 \\ при & x_a < x < x_b & x \notin D_0, D_1 \end{array} \right. , \qquad (2.97)$$

Коли виконується умова $x_a < x < x_b$ наступає відмова від розпізнавання. Відмова від розпізнавання свідчить, що наявної інформації недостатньо для прийняття рішення і потрібні додаткові дані.

При попаданні в зону невизначеності слід використовувати зрізаний метод. Він полягає в тому, що при досягненні встановленої кількості накоплені значення логарифму відношення правдоподібності порівнюються тільки з одним порогом C при $n_i = n_{max}$. Найчастіше $C = 1$.Тобто:

$$\left| \begin{array}{l} \ln C_0 < \ln L\left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) \;\Rightarrow\; \left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) \in D_0 \\ \\ \ln C_0 < \ln L\left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) < \ln C_1 \Rightarrow \ln L\left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) \begin{array}{c} D_1 \\ > \\ < \\ D_0 \end{array} \ln C, \\ \\ \ln C_1 < \ln L\left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) \;\Rightarrow\; \left(x_1 \ldots x_{n_{\max}}\right) \in D_1 \end{array} \right. \qquad (2.98)$$

При використанні цього методу вірогідність помилок $\alpha_{зріз}$ і $\beta_{зріз}$ є більшими ніж $\alpha_{зад}$ і $\beta_{зад}$, так як помилкові рішення можливо і не з'явилися б при продовженні діагностування за послідовною схемою.

Аналіз даних методів свідчить, що для адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів в умовах апріорної не обумовленості необхідно визначити наступні дані:

– закони розподілу віброакустичної ознаки $W\left(\vec{x}/D_1\right)$ і $W\left(\vec{x}/D_0\right)$ для класів;
– значення помилок першого і другого виду α і β;
– максимальну кількість діагностичних ознак n_{max} для штучного зрізування;
– величину порогів C, C_0 та C_1.

Наведені теоретичні основи були використані нами для розробки комп'ютерної програми прийняття рішення, при діагностуванні ЦПГ дизельних двигунів за діагностичною ознакою – фазою виникнення віброакустичного посилання від перекладки поршня.

2.4. Висновки по розділу 2

1. Визначені закономірності формування віброакустичних імпульсів від перекладки поршня, з врахуванням основних сил та сил інерції, які впливають на величину результуючої сили, що й спричиняє перекладку.
2. Уточнена математична модель радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ, що характеризується поступальним і обертальним рухом останнього в процесі перекладки, та врахуванням всіх можливих сил реального механізму.
3. Визначена теоретична залежність фази виникнення віброударного посилання від зазору в спряженні “поршень-гільза”.
4. Теоретично обґрунтована залежність ширини спектру віброакустичного сигналу від тривалості співударяння поршня об гільзу.
5. Обґрунтовано метод прийняття рішення про технічний стан ЦПГ, який базується на основі адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів прийняття рішення при діагностуванні.

РОЗДІЛ III
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Віброакустичний метод контролю технічного стану механізмів оснований на аналізі пружних коливань, що розповсюджуються по корпусу і деталях, в результаті взаємодії останніх. У зв'язку з цим однією з основних задач цього методу є розподіл сигналів, тобто виявлення віброакустичного сигналу (ВАС) викликаного співударами деталей досліджуваної кінематичної пари.

Складність цього завдання полягає в тому, що збільшення числа циліндрів веде до підвищення густоти віброімпульсів на одиницю фазового простору (цикл роботи ДВЗ по куту повороту колінчастого валу). Так, в енергетичній установці, фазовий простір тільки від газорозподільчого механізму заповнений віброімпульсами так, що однозначно визначити технічний стан *i*-го з'єднання цього механізму за одним параметром неможливо. Для підвищення достовірності діагностування необхідна оцінка декількох діагностичних параметрів.

Проведений теоретичний аналіз по відношенню до діагностичних приладів і систем показав доцільність вибору таких параметрів: полоса частот (ультразвуковий діапазон), амплітуда і фаза ВАС. Останній слід вибирати за основний, так як йому притаманна більш висока стабільність (менший приріст основної похибки) ніж амплітудному.

3.1. Програма експериментальних досліджень

На основі аналізу літературних джерел, теоретичних передумов і розробленої математичної моделі експериментальні дослідження передбачали:

1. Вивчення характеристики умов роботи енергетичної установки для машин лісотехнічних робіт з метою визначення всіх факторів, які впливають на зношення ЦПГ.
2. Проведення лабораторних випробовувань з метою отримання вхідної інформації щодо віброакустичних коливань ЦПГ для різних значень зношення.

3. Визначення оптимального частотного діапазону за сукупністю (N_{0j}+N_{1j}) спряжень з побудовою спектрів потужності процесу.

4. Визначення параметрів роботи алгоритму обробітку сигналів, які реалізують метод двостороннього контрасту.

5. Обґрунтування методу прийняття рішення про технічний стан ЦПГ, що базується на основі адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів Байєса, максимальної правдоподібності та зрізаного. Розробити комп'ютерну програму, яка б реалізувала даний метод.

6. Розробку приладу для діагностування ЦПГ за фазовими параметрами віброударних посилань, виділених в зарезонансній зоні ультразвукового діапазону та методику визначення фази за його допомогою.

7. Удосконалення методики індивідуального прогнозування залишкового ресурсу за параметром фази виникнення віброударного відгуку з побудовою номограми та розробкою комп'ютерної програми прогнозування.

8. Визначення економічної ефективності розробленого віброакустичного методу діагностування ЦПГ.

3.2. Методика обчислювальних та експериментальних досліджень

3.2.1. Моделювання залежності фази виникнення віброударного посилання від зазору в ЦПГ

Для визначення залежності фази віброударного посилання від зазору в спряженні "поршень-гільза" на основі математичної моделі розглянутої в розділі 2 була написана програма на мові MathCad2010 (додаток Б).

Вхідними для роботи програми були дані наведені в додатку А. Алгоритм вирішення даної задачі передбачає таку систему послідовності:

– у відповідності до заданої частоти обертання (n=750,1000...2000) послідовно розраховуються вектори: лінійної швидкості поршня, прискорення зворотньо–поступального руху поршня, кутового прискорення шатуна, кута нахилу шатуна, сили газів, значення бокової сили та сили інерції для різного фазового положення кривошипа;

– формується вектор J_i (i=0,1...16) кутів нахилу поршня (γ=0.0014,0.0165...0.0054) та зазору ($h(\gamma)$=0.00022,0.00026...0.00086) у функції від кута нахилу;

– для розв'язку системи диференційних рівнянь створюється вектор початкових умов y на інтервалі $x1$, $x2$ (i-ті значення зазору, швидкості радіального переміщення поршня, кута нахилу поршня, швидкості зміни кута нахилу в початковий момент відліку фази);

– формується речовинний вектор $D(\phi,y)$ значень функції, який містить в собі похідні невідомих функцій;

– розраховується система диференційних рівнянь методом Булирша-Штёра;

– розрахунки продовжуються до моменту досягнення значення зазору 10^{-10} м;

– перегруповується вектор початкових умов для елементів $i+1$ і повторюється розв'язок диференційних рівнянь. Таке перегрупування здійснюється до i=16;

– повторюються розрахунки для наступної частоти обертання колінчатого валу;

– результати визначення фази і швидкості в момент удару в залежності від зазору в ЦПГ та частоти обертання колінчатого валу заносяться у матрицю Faza та Skor_udar.

3.2.2. Методика зняття віброударних характеристик перекладки поршня в зазорі ЦПГ

Для запису віброударних характеристик перекладки поршня в зазорі ЦПГ використовувався програмно-апаратний комплекс МІС-200. До складу якого входили:

– ПЕОМ Notebook PC;

– апаратні засоби збору інформації (інструментальні плати АЦП-ЦАП і модулі фірми L-card);

– програмно-апаратні засоби для досліджень, технічного контролю, моніторингу і діагностики механізмів (програмний продукт “Пакет обробітку сигналів” ПП ПОС).

Програмно-апаратний комплекс ПОС має ліцензію метрологічної експертизи.

Загальний вигляд комплексу ПОС та блок-схему тракту крейтової системи для введення аналогових даних зображено на рис.3.1.

Аналіз літературних джерел [15,18] дозволив визначитися з даними параметрами (рис.3.2). Вибиралися два місця встановлення датчика: шпилька кріплення головки блоку відповідного циліндра; прилив блоку напроти відповідного циліндра на віддалі 90 мм від головки циліндрів. Способи кріплення – на шпильці, та за допомогою спеціального притискного кріплення. Були спроби закріпити датчик за допомогою епоксидної смоли, але зважаючи на велику тривалість встановлення даний спосіб був прийнятий за не перспективний.

Вібраційний сигнал, що випромінюється досліджуваним сполученням сприймався вібраційним датчиком (B&K Type 4333 №272437, Д-14, ИС-317). Перед встановленням датчики калібрувались у відповідності з ГОСТ 25175–82 [34]. Калібрувальна характеристика акселерометра зображена на рис.3.3.

Введення даних розпочиналось запуском програми Pos.exe. Далі проводилось налагодження системи на введення даних. Для цього вибирають

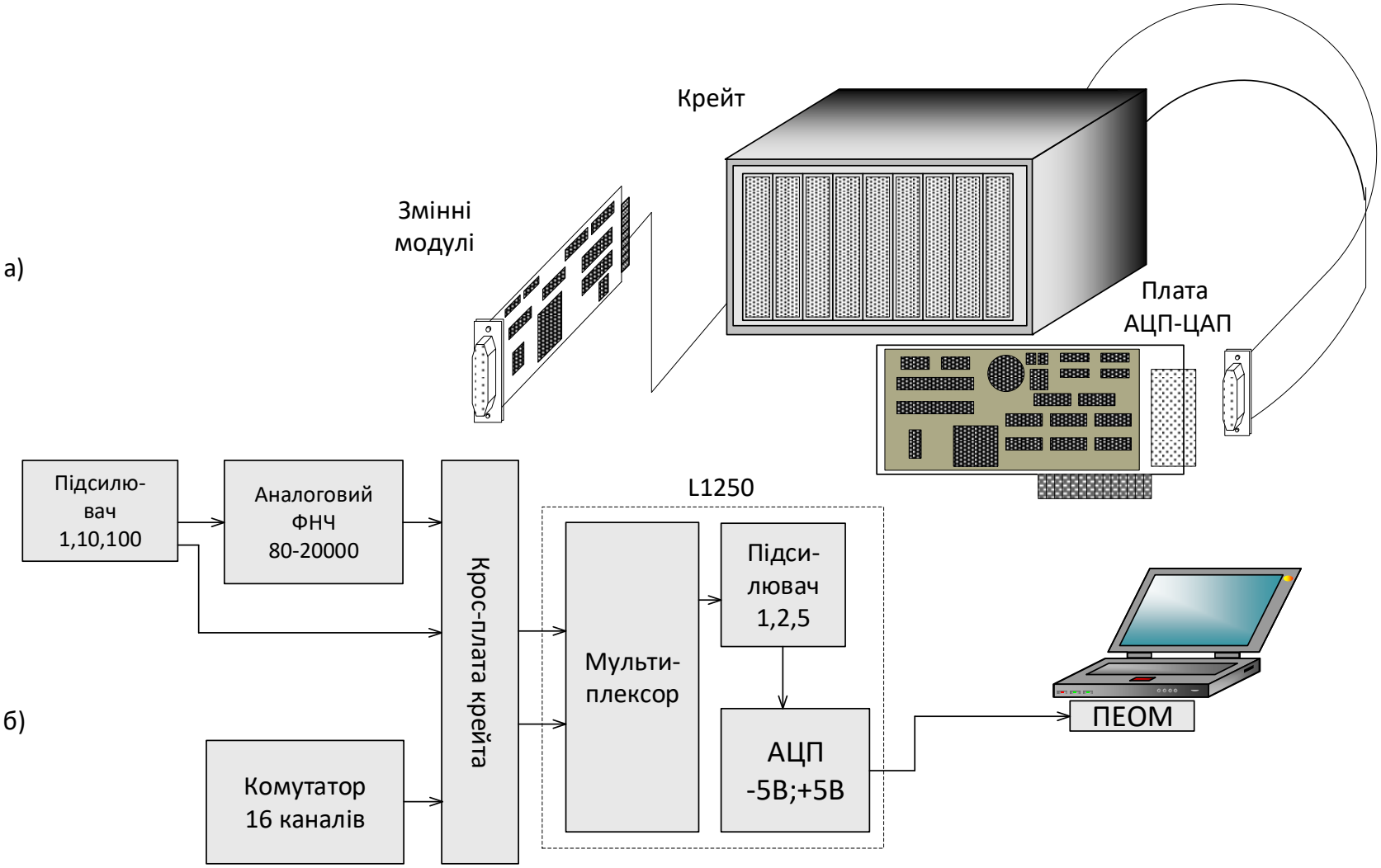


Рис 3.1. Загальний вигляд комплексу ПОС -*а* та блок-схема аналогового тракту крейтової системи -*б* .

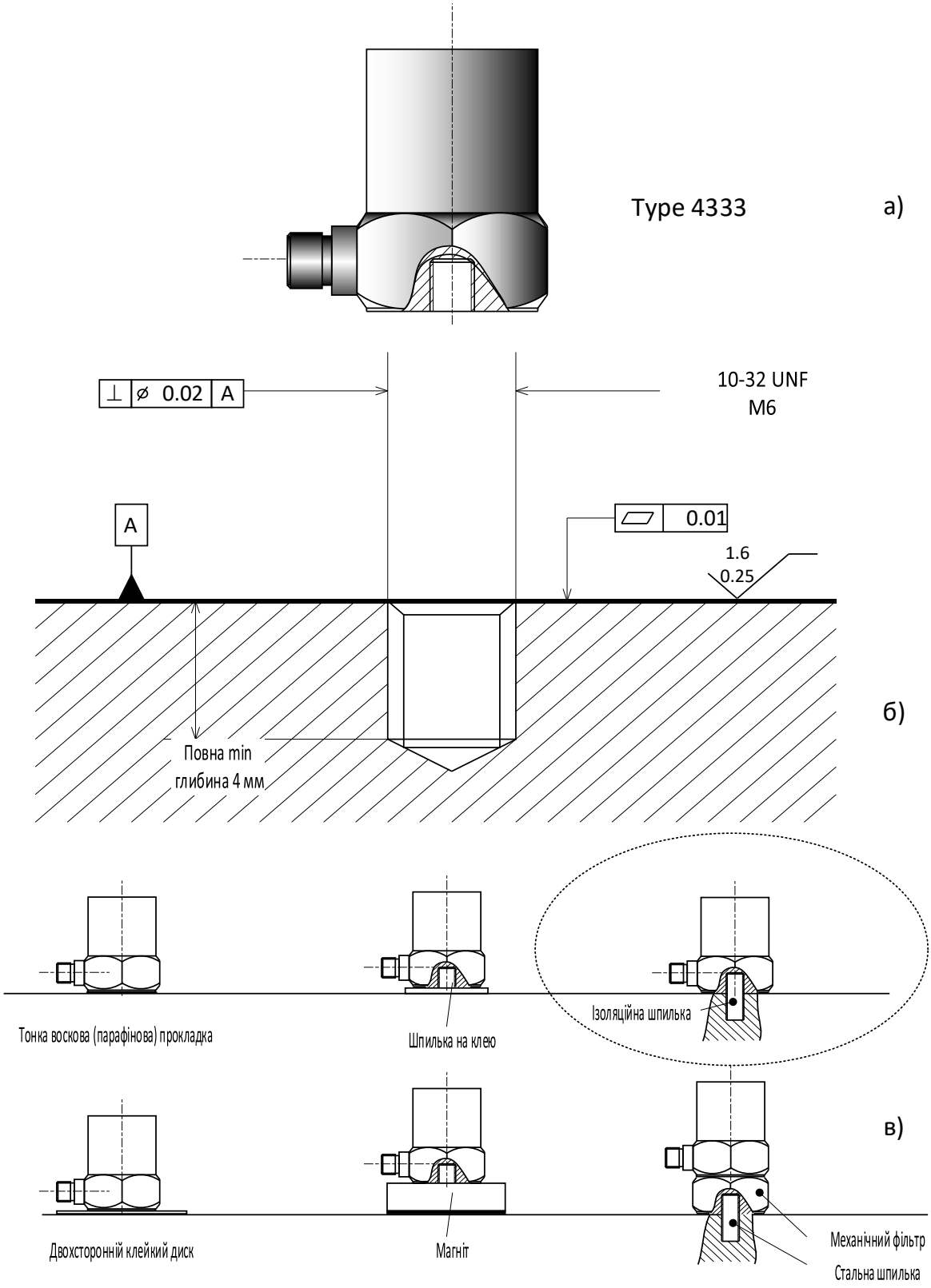


Рис.3.2. Загальний вигляд датчика та способів його кріплення:
а-загальний вигляд акселерометра;
б-вимоги до місця кріплення;
в-можливі способи кріплення датчика

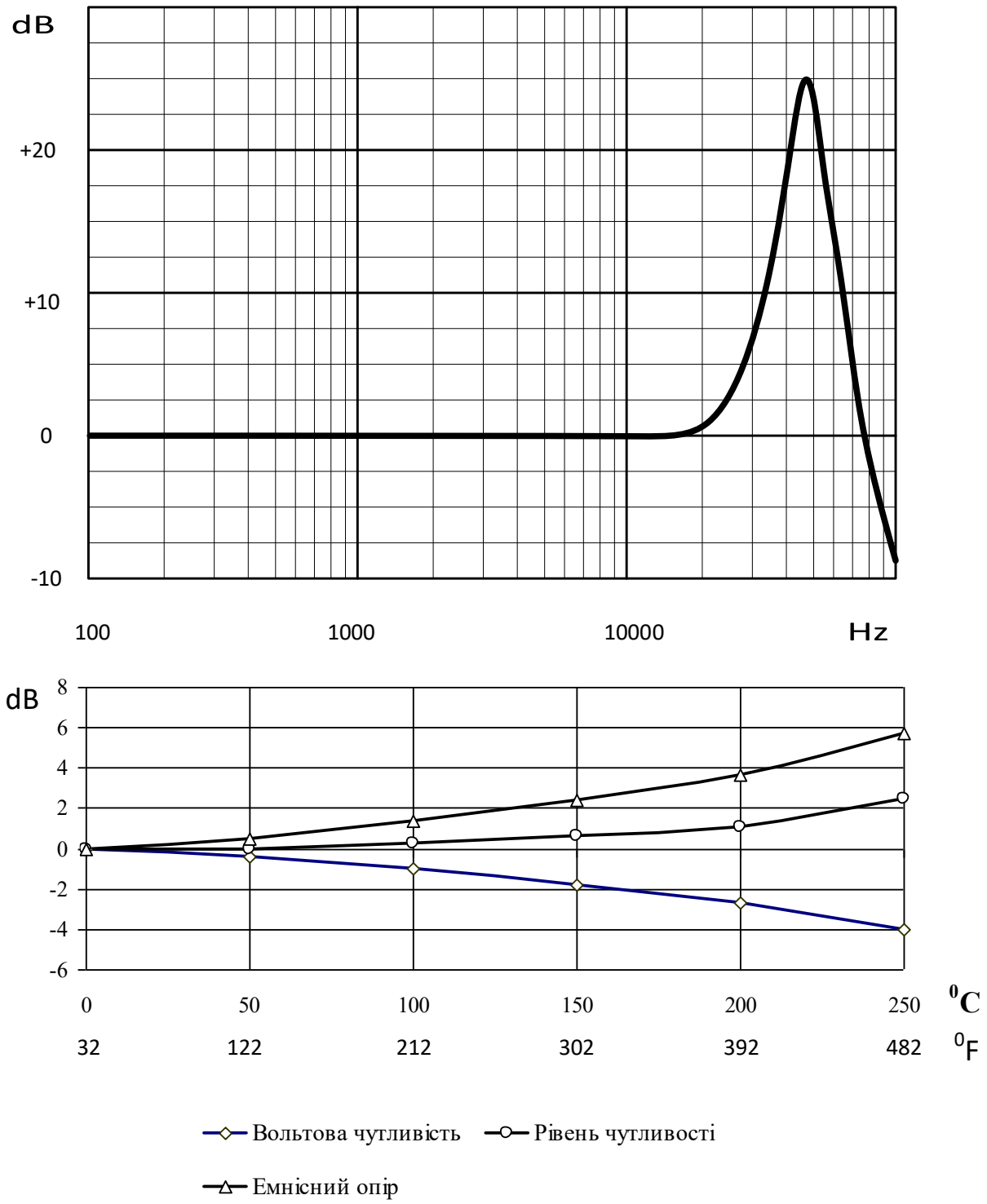


Рис.3.3. Калібрувальна характеристика акселерометра Brűel & Kjær Type 4433 (серійний №272437).

режим “*LCARD*”, який активізує програмні модулі керування апаратними засобами збору інформації. При цьому почергово звертаються до окремих процедур роботи комплексу.

Процедура *SetParamKrait* встановлює початкові параметри крейтової системи для введення інформації через два канали програмно-апаратного комплексу МІС-200. Програмуються наступні блоки крейтової системи:

– *крейт* (тип крейту; кількість крейтів; кількість модулів в крейті; вибір модулів – підсилювачі, фільтри чи комутатори; вид живлення крейту);

– *інструментальні підсилювачі* (розташування в крейті; місця підключення входів; початкове підсилення по каналах (вибирається, щоб досліджуваний сигнал не обрізався (рис.3.4.); пристрій вибору та зберігання інформації);

– *аналогові фільтри* (розташування в крейті; місце підключення входів; тип використовуваних вікон; частота зрізу);

– *комутатор* (розташування в крейті; коефіцієнт підсилення для під’єднуваних каналів (з комутатором з’єднувався оптичний відмітчик ВМТ);

– *аналого-цифровий перетворювач АЦП* (тип АЦП; частота дискретизації, мкс; довжина записуваного сигналу, с; тип початкової обробки сигналів; коефіцієнт підсилення сигналів платою; граничні значення вхідного сигналу; вид сигналу (код, вольти); та інші важливі параметри).

Процедура *SetParamToFile* встановлює параметри крейтової системи для введення оцифрованої інформації в окремий файл, (ім’я файлу(*.usm), послідовність записуваних сигналів в файлі).

Процедура *SetParamToBufer* встановлює параметри крейтової системи стенда для введення оцифрованої інформації в буфера пам′яті, відведені ПОСом, також довжину та послідовність введених сигналів в буферах.

Процедура *DiagChannel* діагностує віброканали на наявність несправності кабелей вібродатчиків шляхом запису сигналів у пам’ять та перевірки їх на характерні ознаки несправності.

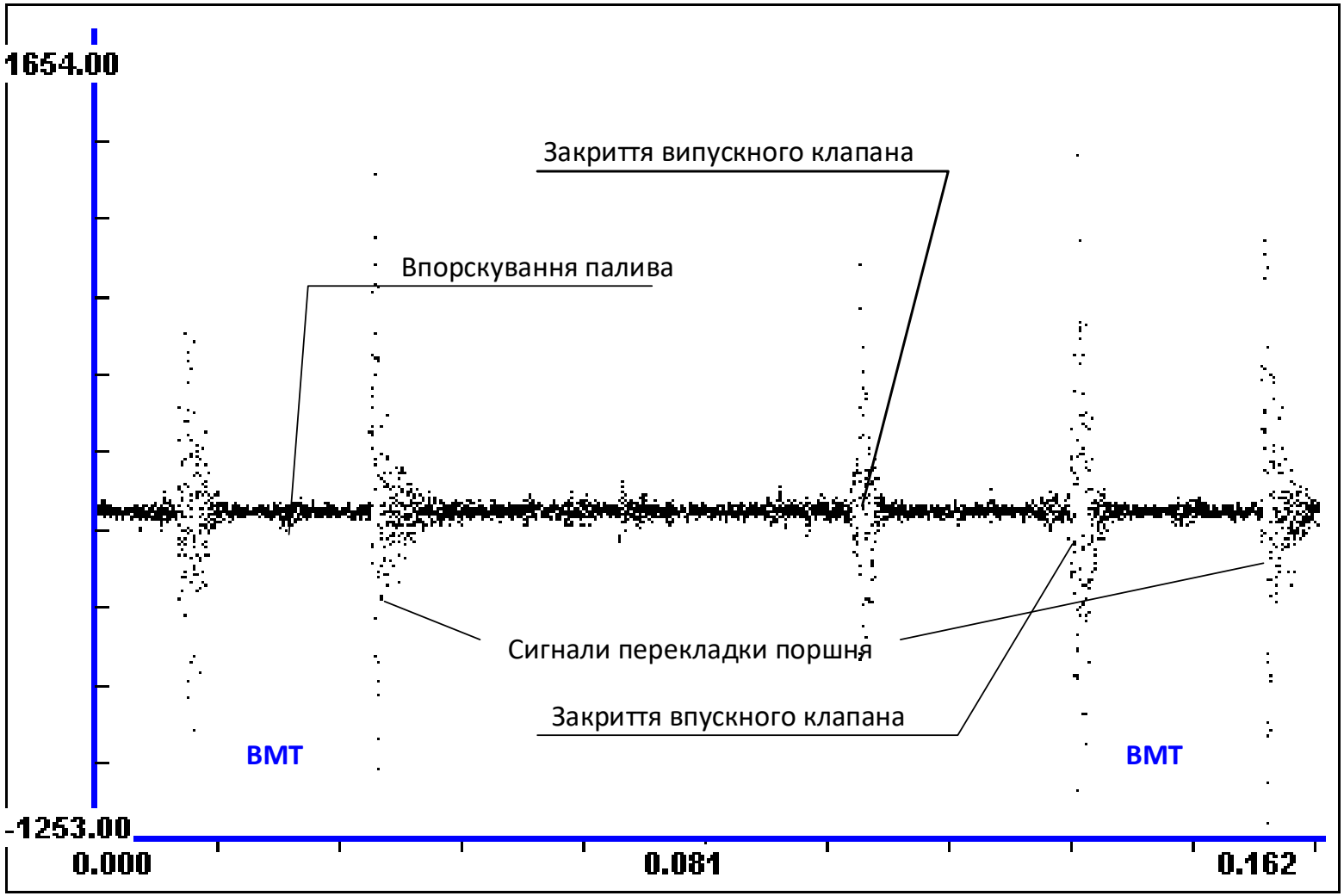


Рис.3.4. Робоче вікно програми АОС з осцилограмою реальних ударів від газорозподільчого механізму, паливної апаратури, ЦПГ двигуна СМД-31А (датчик , який реєструє сигнали ЦПГ B&K Type 4333 встановлений на шпильці)

Процедура *AutoCalibrate* виконує автоматичне регулювання підсилення каналів. По кожному з віброканалів вимірюється максимальне значення амплітуди записаного сигналу та перераховуються коефіцієнти підсилення доти, поки амплітуда записуваного сигналу не прийме належного значення.

Процедура *InputCardToFile* виконує введення в файл інформації згідно встановленим параметрам. При виконанні процедура перевіряється на правильність завершення.

Після виконання всіх процедур налагодження параметрів крейтової системи, проводили запис віброакустичних сигналів на жорсткий диск ПЕОМ. Час запису тривав 15с. Всі записані файли мали назву exp#_№_.usm. Розмір файлів близько 4800К.

Структура інформаційного файлу типу УСМЛ складається із:

– заголовку інформаційного файлу (32 байта);
– таблиці паспортів параметрів (58•<кількість параметрів>);
– інформації (додаток В.1).

В свою чергу заголовок інформаційного файлу містить відомості наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Структура заголовку файла УСМЛ

УСМЛ	Ім’я виробу	Ім’я досліду	Дата випробовування ГГ.|ММ.|ДД	Кількість параметрів (характеристик)	Резервне поле
4 байт	8 байт	8 байт	8 байт	2 байт	2 байт
УСМЛ	CARD-ПОС	exp#20	06.10.99	4	-

Структура паспорту параметру включає наступні дані:

– ім’я параметра (циліндр, форсунка і.т.д.);
– ім’я характеристики чи НЗ;
– розмірність (в байтах);

– дискретність;

– К0, К1 (коефіцієнти підсилення);

– довжина масиву (кожного параметру);

– формат (ANSI);

– Тн, Тк (коефіцієнти).

Після введення даних до ПЕОМ дані про експеримент заносилися в журнал експериментів у формі (табл. 3.2):

Таблиця 3.2

Форма запису експериментальних даних

Номер експерименту та назва записаних параметрів	Коефіцієнт підсилення
exp#58 (частота обертання –750) Циліндр №3, без фільтрації, Шпилька. 1. Насос 2. Форсунка 3. Циліндр 4. ВМТ	 > 9 > 19 > 8

Експериментальні дані записувалися у два етапи. Дані записані на першому етапі використовувалися для визначення частотної характеристики віброударних посилань ЦПГ, вибору місця та виду кріплення.

Дані другого етапу використовувалися для перевірки теоретичної моделі, стосовно залежності фази виникнення віброударних імпульсів, викликаних перекладкою поршня, від зазору в ЦПГ.

3.2.3. Методика виміру структурних параметрів ЦПГ

Перед початком запису віброакустичних сигналів проводять мікрометраж деталей циліндро-поршневої групи у відповідності з картами мікрометражу, ГОСТ 18509–80. Параметри і засоби вимірювання деталей ЦПГ приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Засоби вимірювання зношення деталей циліндро–поршневої групи дизеля СМД-31А, які використовувались при мікрометражі.

Структурний параметр	Засоби вимірювання
Внутрішній діаметр циліндра	Нутромір індикаторний НІ; ГОСТ868–72; межі виміру, мм (100–160); ціна поділу індикаторної головки–0,001мм; Гранична похибка вимірювання ±1,5мкм.
Зовнішній діаметр поршня	Мікрометр МК 125–1 ГОСТ 6507–78(100...125мм) ціна поділу 0,01 мм, Допустима похибка ±0,004мм
Ширина прямокутної канавки під поршневі кільця	Набір щупів №5 ГОСТ 882–64 Клас точності 1
Товщина поршневого кільця	Мікрометр МК 25-1 ГОСТ 6507–78; (0...25мм) ціна поділу 0,01 мм, Допустима похибка ±0,004мм

3.2.4. Методика обробітку експериментальних даних

Отримані в результаті лабораторних випробовувань дані оброблялися за методикою зображеною на рис.3.5. Використовувався інтерактивний режим роботи пакету ПОС. Попередньо теоретично аналізувалися можливі удари в ЦПГ викликані роботою різних агрегатів. Даний аналіз наведено на рис.3.6.

Початковим етапом було створення навчальних послідовностей спряжень, тобто віднесення записаних сигналів до одного з класів: для нормального (клас D_0) і граничного (клас D_1) зазорів в ЦПГ.

– Кількість N_0 спряжень класу D_0;
– Кількість N_1 спряжень класу D_1.

Наступним етапом обробітку експериментальних даних є визначення оптимального місця кріплення вібродатчика.

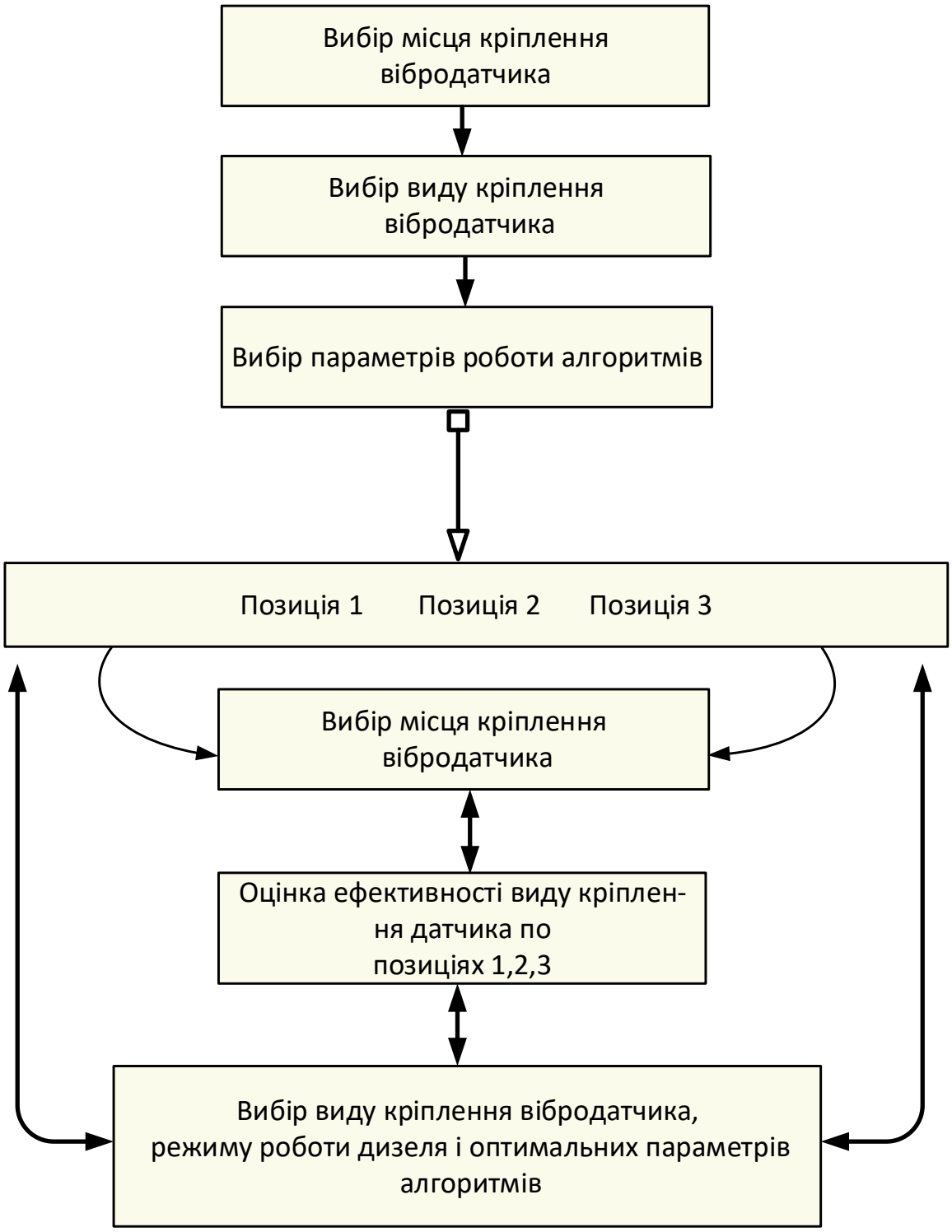


Рис.3.5. Структура методики обробітку експериментальних даних. (Позиція 1, 2, 3 - частота обертання відповідно -750, 1000 та 1250 хв$^{-1}$).

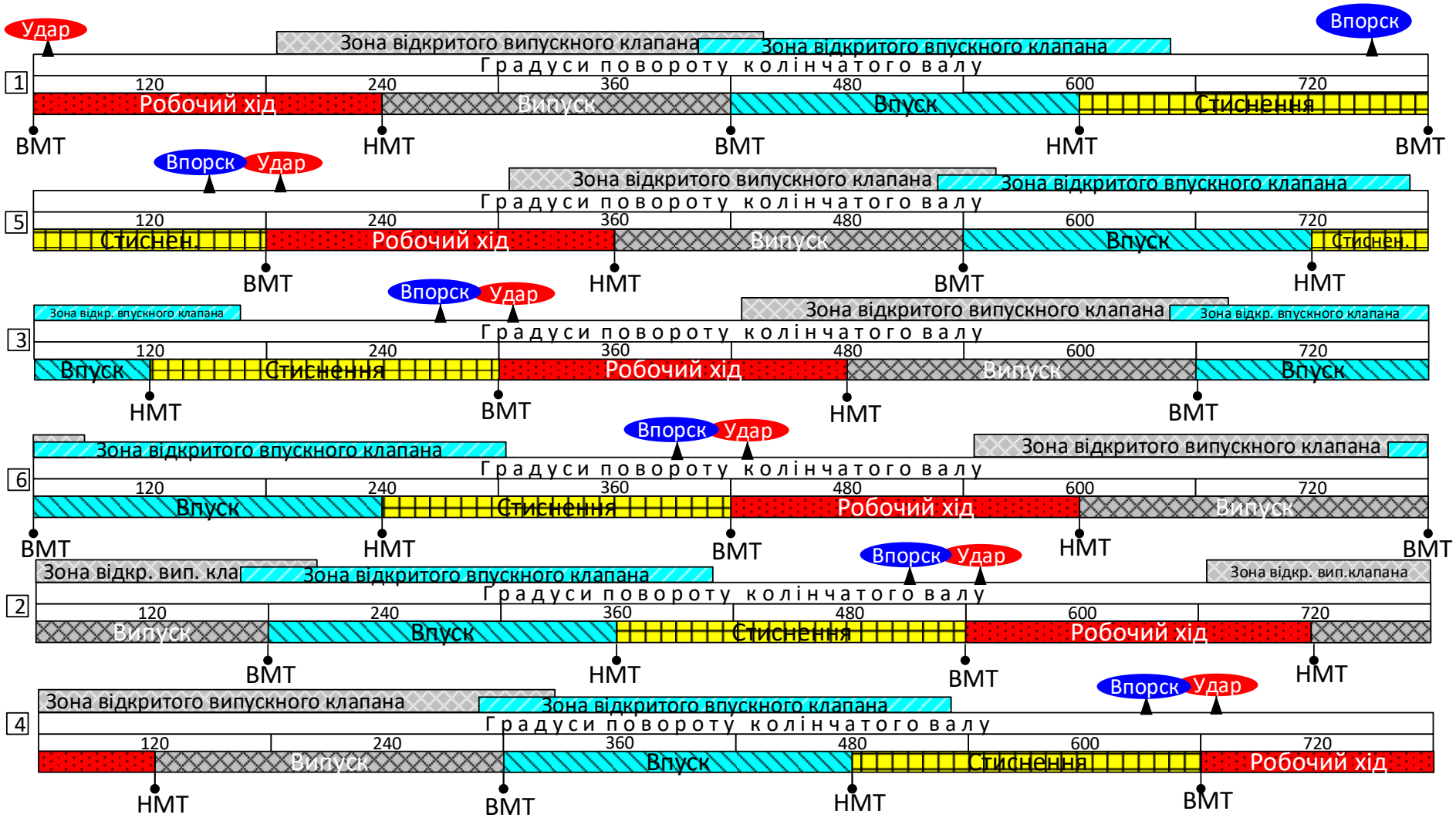


Рис.3.6. Теоретична діаграма ударів від газорозподільчого механізму, паливної апаратури, ЦПГ по окремих циліндрах двигуна СМД-31А та їх фазова реалізація.

Для кожного *<u>місця кріплення</u>* передбачалося:

1) визначити оптимальний частотний діапазон за сукупністю (N0+N1) спряжень;
2) в оптимальному частотному діапазоні визначити оптимальні параметри виявлення і ідентифікації та проводиться виявлення сигналів за записом в 15 с і проводили формування масиву значень діагностичної ознаки. За діагностичну ознаку приймали фазу віброакустичного імпульсу при максимальному значенні потужності процесу;
3) оцінити математичне очікування і середньоквадратичне відхилення фази для класів і критерій Фішера;
4) побудову гістограми фази для класів D_0 і D_1, за якими визначали поріг діагностики за критерієм ідеального спостерігача;
5) обчислення нижньої довірчої межі для сумарної вірогідності правильної діагностики за другою половиною сигналів для класу D_0 і D_1;
6) за отриманими нижніми межами і критерієм Фішера проводився вибір місця кріплення датчика.

Частота обертання 750, 1000, 1250 хв$^{-1}$. відповідно позиції (1,2,3)

Створюються навчальні послідовності спряжень, для класів D_0 і D_1 – N_{0j} і N_{1j}, де "j" – індекс позиції частоти обертання.

Далі для кожного *<u>виду кріплення</u>* передбачалось:

1) визначення оптимального частотного діапазону за сукупністю (N_{0j}+N_{1j}) спряжень і побудову спектрів потужності;
2) в оптимальному частотному діапазоні отримати оптимальні параметри виявлення і ідентифікації та провести виявлення сигналів за записом в 15 с (для частоти 750 хв$^{-1}$, результатом якого є сформований масив значень діагностичної ознаки. За діагностичну ознаку приймалася фаза удару та амплітуда;
3) оцінити математичне очікування і середньоквадратичне відхилення ознаки для класів і критерій Фішера;

4) побудувати гістограми ознаки для класів D_0 і D_1, за якими визначити пороги діагностики за критерієм ідеального спостерігача;
5) оцінити нижні довірчої межі для сумарної вірогідності правильної діагностики за другою половиною сигналів для класу D_0 і D_1;
6) провести вибір місця кріплення датчика

Вибір діагностичної частоти обертання колінчастого валу проводять за оцінкою гістограм ознаки для класів D_0 і D_1 виходячи з високої надійності розпізнавання, а також за величиною математичного очікування та середньоквадратичного відхилення.

Результатом експериментів по позиціях 1,2,3 були – три оцінки критерію Фішера і три нижніх межі оцінки сумарної Σ вірогідності правильної діагностики для кращих видів кріплення (шпилька, притискування за допомогою кріплення), для кращого місця кріплення, позиції (режиму роботи дизеля), і оптимальних параметрів алгоритмів.

3.2.5. Методика оцінки оптимального частотного діапазону

Методика оцінки оптимального частотного діапазону для кожної позиції (частоти обертання) включає наступні кроки:

1. Отримання для заданої частоти обертання колінчатого валу для кожного циліндра когерентної середньої (по 5 ти реалізаціях) спектральної щільності потужності “сигнал + перешкода” із врахуванням різних коефіцієнтів підсилення.

2. Отримання для кожного циліндра когерентної середньої (по 5 ти реалізаціях) спектральної щільності потужності “перешкоди” з врахуванням різних коефіцієнтів підсилення.

3. Отримання середньої по всіх циліндрах різниці спектральної щільності потужності “сигнал – перешкода”.

4. Оцінка оптимального частотного діапазону на основі різниці спектральної щільності потужності на основі спектру потужності та логарифмічного (за рівнем –6дБ зліва і справа від максимального значення).

3.2.6. Методика автоматизованого обробітку сигналів

Обробіток віброакустичних сигналів здійснювався за допомогою пакету ПОС. Для визначення діагностичних ознак користуються командним режимом роботи пакету. Даний пакет дозволяє проводити обробіток в такому обсязі:

- спектральний аналіз;
- кореляційний аналіз;
- фільтрацію;
- інтегрування;
- диференціювання;
- перетворення Гільберта і розрахунок його огибаючої.

Також даний пакет дозволяє розрахувати оцінку наступних характеристик:

- щільності розподілу вірогідності;
- математичного очікування;
- дисперсії;
- середньоквадратичного відхилення та асиметрії і ексцесу.

Основою частотного аналізу є перетворення Фур'є. Основними виразами для перетворення Фур'є вхідної послідовності $\{g_n\}$ $n=0,\ldots,N-1$ є:

(пряме)

$$G(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} g(n) \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi kn}{N}}, \qquad (3.1)$$

(обернене)

$$g(k) = \sum_{n=0}^{N-1} G(k) \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi kn}{N}}. \qquad (3.2)$$

Процедурою розрахунку для дискретного перетворення Фур'є є алгоритм швидкого перетворення Фур'є (БПФ).

Рамками спектрального аналізу є оцінка наступних характеристик:

– амплітудного спектру, спектру потужності, спектральної щільності потужності, комплексного спектру;
– функції когерентності, когерентної вихідної потужності, відношення “сигнал-перешкода”.

Дискретне перетворення Фурьє для вибірки процесу {X_k, k=0,…,N-1} визначається за формулою:

$$F(n,N) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi nk}{N}}, \qquad (3.3)$$

Спектр щільності потужності визначається як середнє по М реалізаціях і має розмірність (*ед/Гц).*

$$G_{спм}(n,T) = \frac{1}{\Delta f} \cdot G_{см}, \qquad (3.4)$$

де Δf – частота опитування (в нашому випадку складала 160 кГц.)

Амплітудний спектр визначається через спектр потужності і має розмірність *(ед).* При цьому використовується залежність:

$$G_A(n,T) = \sqrt{G_{см}(n,T)}. \qquad (3.5)$$

Підсистема фільтрації реалізує цифрову рекурсивну фільтрацію і базується на послідовному підключенню канонічних ланцюгів другого порядку. Використовується наступна залежність

$$Y_N = B_0 \cdot Y_{N-2} + B_1 \cdot Y_{N-1} + A_0 \cdot X_{N-2} + A_1 \cdot X_{N-1} + A_2 \cdot X_N, \qquad (3.6)$$

де Y_N– відфільтрований масив;

X_N– вхідний масив;

B_0, B_1, A_0, A_1, A_2 – коефіцієнти фільтра, які розраховуються у відповідності із заданими характеристиками. Можливості пакету ПОС дозволяють використовувати наступні фільтри:

– *еліптичний фільтр шостого порядку* (забезпечує затухання на подвійній частоті зрізу не менше 65 ДБ);

– *Чебишівський фільтр шостого порядку* (забезпечує затухання на подвійній частоті зрізу не менше 60 ДБ);
– *Батервортовський фільтр восьмого порядку* (забезпечує затухання на подвійній частоті зрізу не менше 60 ДБ).

Всі перераховані фільтри задовольняють із запасом вимоги для фільтрів 1 класу (фільтри для точних лабораторних і натурних вимірів) у відповідності до ГОСТ 17168–82. Приклад вихідного і відфільтрованого сигналів зображені на рис.3.7. та масштабування 3-х реалізацій (рис.3.9).

Для перевірки якості вибраного фільтру отримані амплітудно–частотні і фазово–частотні характеристики (рис.3.8.) синтезованого фільтру на інтервалі частот:

a) $0 < F < 2 \cdot F_{cp}$ для НЧ фільтра;

b) $F_n / 2 < F < 2 \cdot F_v$ для полосового фільтра;

c) $F_{cp} / 2 < F < 2 \cdot F_{cp}$ для ВЧ фільтра,

де F_{cp} – частота зрізу для НЧ–, ВЧ– фільтрів;

F_n, F_v – нижня і верхня частоти зрізу для полосового фільтру.

Як зазначалося раніше для визначення діагностичних ознак, якими виступали фаза і відносна амплітуда віброакустичного посилання від перекладки поршня в зазорі ЦПГ користуються командним режимом роботи пакету ПОС. Тобто користуються програмним забезпеченням, яке розробляється у відповідності із завданням з відповідним алгоритмом

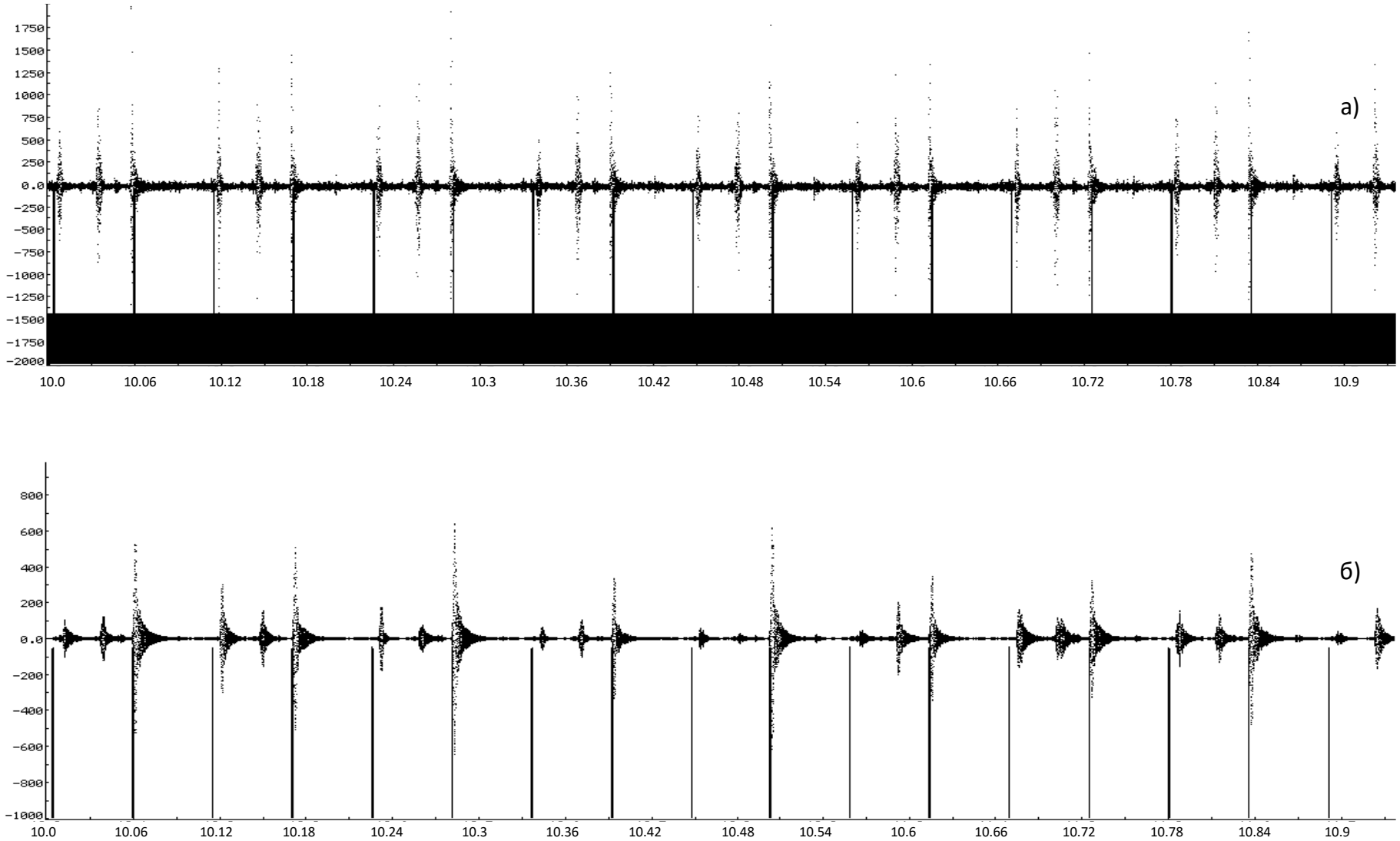


Рис.3.7. Віброакустичні реалізації двигуна СМД-31А при 1000 хв-1 (робоче вікно пакету ПОС):
а - нефільтрований сигнал;
б - фільтрований сигнал (частота фільтрації 70 кГц).

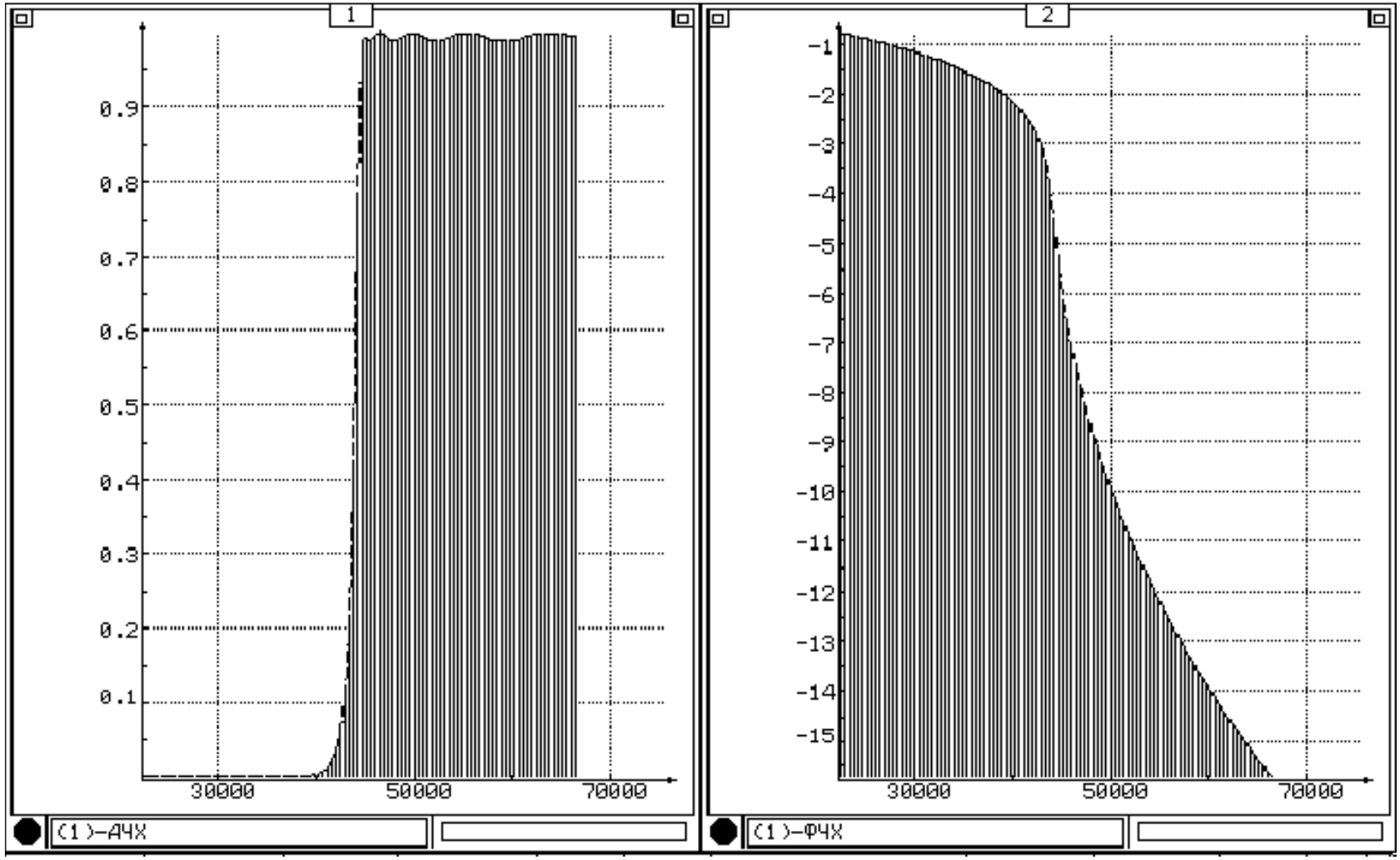


Рис.3.8. Амплітудно частотна та фазова характеристики фільтру високої частоти при частоті зрізу 45 кГц (робоче вікно пакету ПОС).

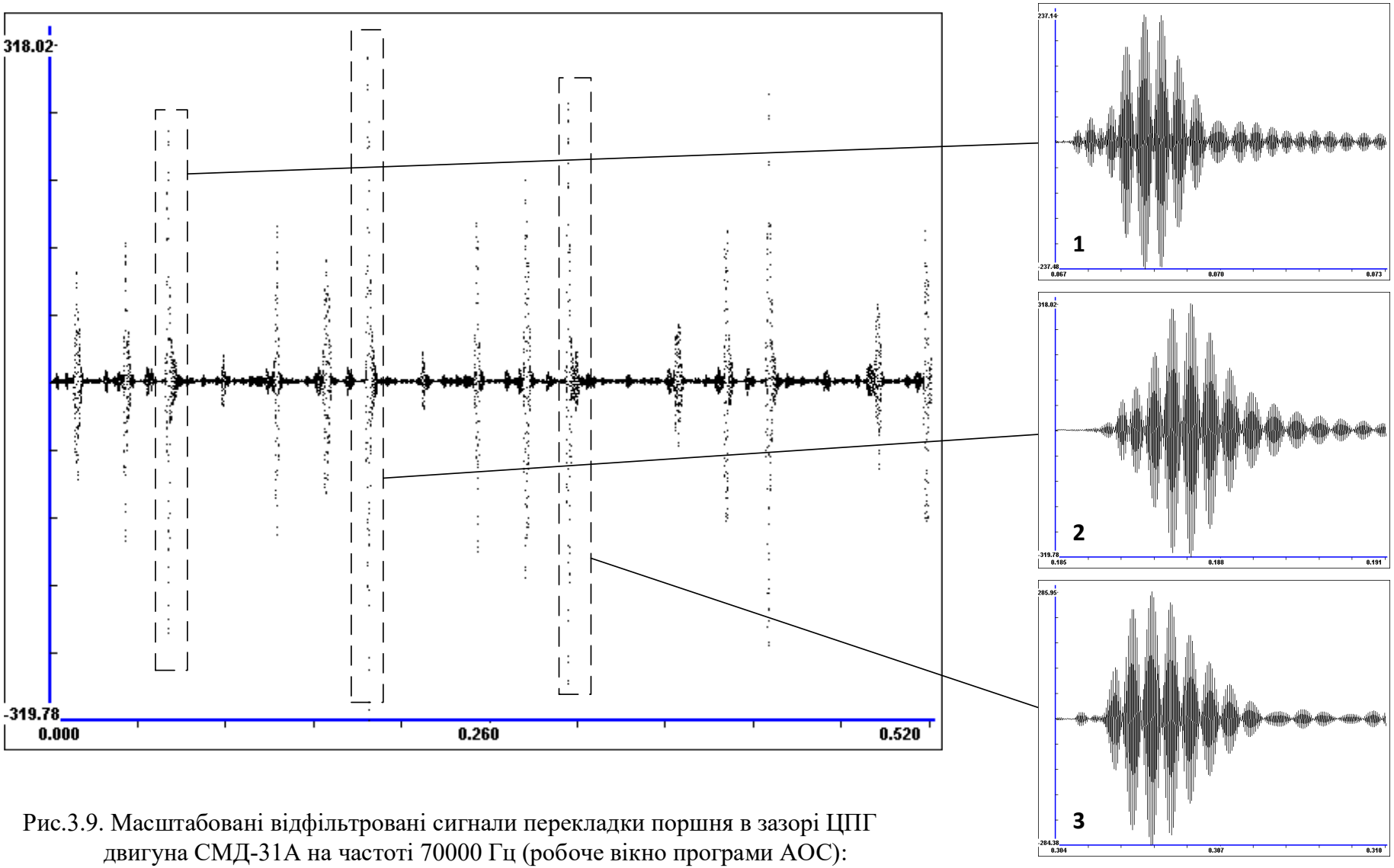


Рис.3.9. Масштабовані відфільтровані сигнали перекладки поршня в зазорі ЦПГ двигуна СМД-31А на частоті 70000 Гц (робоче вікно програми АОС):
1 - перша реалізація; 2 - друга реалізація; 3 - третя реалізаця сигналу.

роботи. Для нашого дослідження ми використовували розроблені програми, у співучасті з програмістами відділу віброакустичного діагностування НВО “Славутич”. Тексти програм не приводяться із-за великого обсягу останніх.

Після цифрової фільтрації в оптимальному діапазоні вираховується огинаюча діагностичного сигналу. Подальший обробіток огинаючої здійснюється за допомогою алгоритму двостороннього контрасту в часовій області (додаток В.2). Базою роботи даного алгоритму є відношення “сигнал – перешкода”. Алгоритм працює наступним чином. Вибирається стробуючий імпульс (задається кут початку і кінця відносно ВТМ робочого ходу). В стробуючому імпульсі від початку до кінця рухаються три вікна певного розміру (ліве бокове, центральне і праве бокове) (рис.3.10.). На кожному відліку вираховується математичне очікування центрального ($MOCenter$) і бокових плаваючого лівого ($MOLeftVar$) та правого ($MORightVar$) вікон. Далі розраховується їх відношення ($PShum$) за залежністю:

$$PShum = \frac{2MOCenter}{\begin{array}{l} MOLeft\left(MOLeftVar = Min\right) + \\ MORight\left(MORightVar = Min\right) \end{array}} >< PorogC, \quad (3.7)$$

Точка, в якій це відношення буде найбільше, відповідає максимуму потужності процесу. При цьому фіксуються діагностичні ознаки: фаза (Ugol) і відносна амплітуда (DiagnPr).

Для вибору оптимальних параметрів роботи алгоритму обробітку змінюються наступні параметри роботи програми:

- кут початку стробу відносно ВМТ робочого ходу;
- кут кінця стробу відносно ВМТ робочого ходу;
- ширина лівого бокового вікна;
- ширина правого бокового вікна;
- ширина лівого плаваючого вікна;
- ширина правого плаваючого вікна;

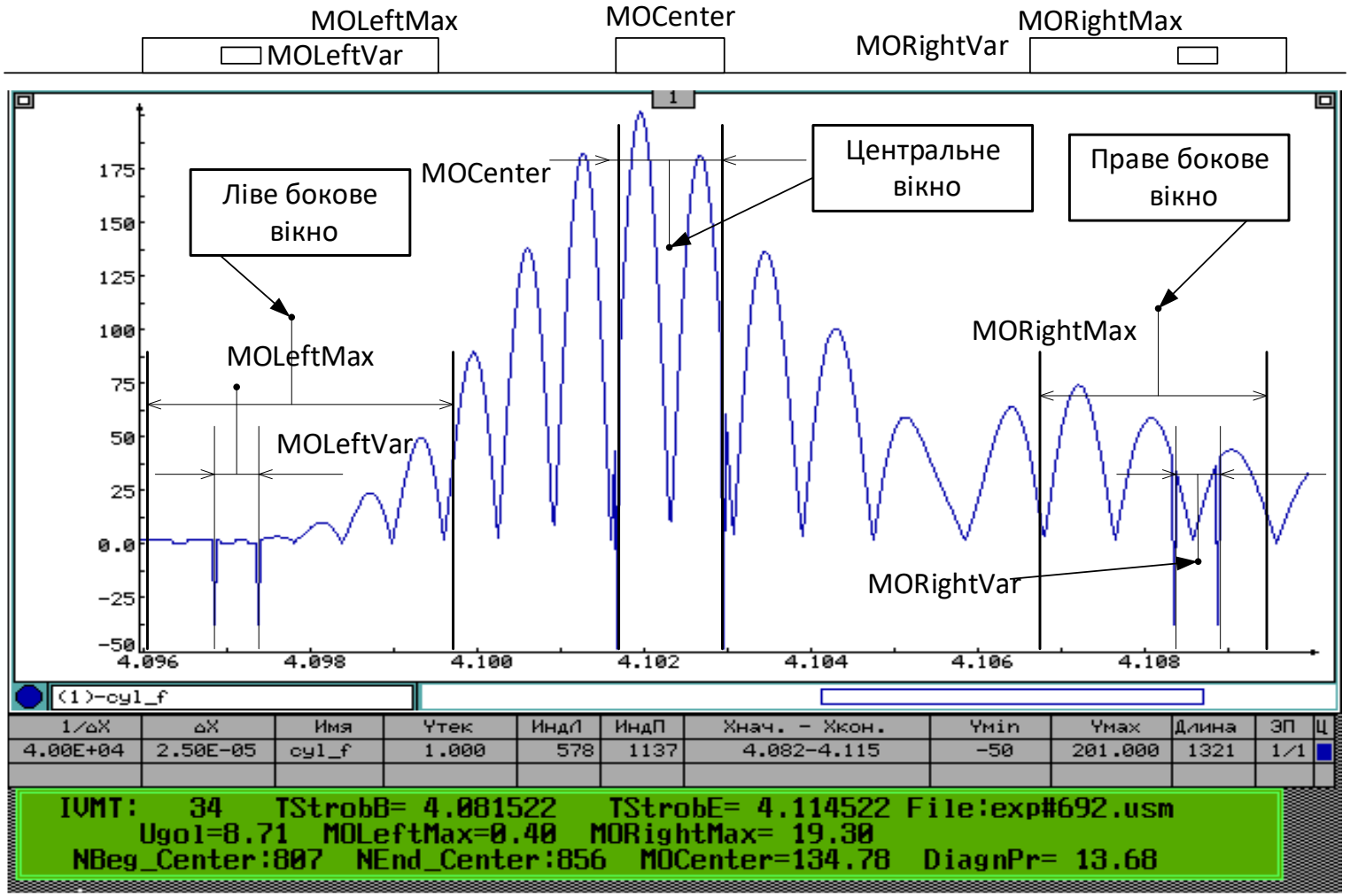


Рис.3.10. Робоче вікно пакету ПОС, параметри та алгоритм роботи програми виявлення віброакустичного посилання від перекладки поршня в зазорі ЦПГ.

– ширина лівого проміжного вікна;
– ширина правого проміжного вікна;
– ширина центрального вікна;
– тип фільтру (Чебишева, еліптичний, Батерворта);
– вид фільтру (ФНЧ, ФВЧ, полосовий);
– нижня частота зрізу фільтра;
– верхня частота зрізу фільтра;

Вибір параметрів роботи алгоритмів продовжують до досягнення оптимального значення. Оптимальними вважаються параметри роботи програми, при яких проходить правильний вибір максимуму потужності процесу для справного і несправного спряження ЦПГ. Оптимальність правильного вибору перевіряли за залежністю:

$$optA = \min_{k_i = 1}^{K_\Sigma} \left\| \frac{\sum_{j=1}^{n_n} \left(\left| \varphi_0^p - \varphi_0^r \right| \right)^2 + \sum_{j=1}^{n_n} \left(\left| \varphi_1^p - \varphi_1^r \right| \right)^2}{K_\Sigma} \right\|, \qquad (3.8.)$$

де φ_0^p, φ_0^r, φ_1^p, φ_1^r – відповідно фази для справного стану ЦПГ визначені програмою, вручну та фази для не справного стану ЦПГ визначені програмою і вручну;

n_n – кількість об’єктів аналізу справного (несправного станів);

K_Σ – загальна кількість справних і несправних об’єктів порівняння.

Тобто оптимальними вважаються параметри, при яких усереднений квадрат модуля різниці між фазами, визначеними програмою і вручну, мінімальний.

Результатом роботи програми обробітку сигналів за алгоритмом двостороннього контрасту є створення текстового файлу приведеного в додатку Д.

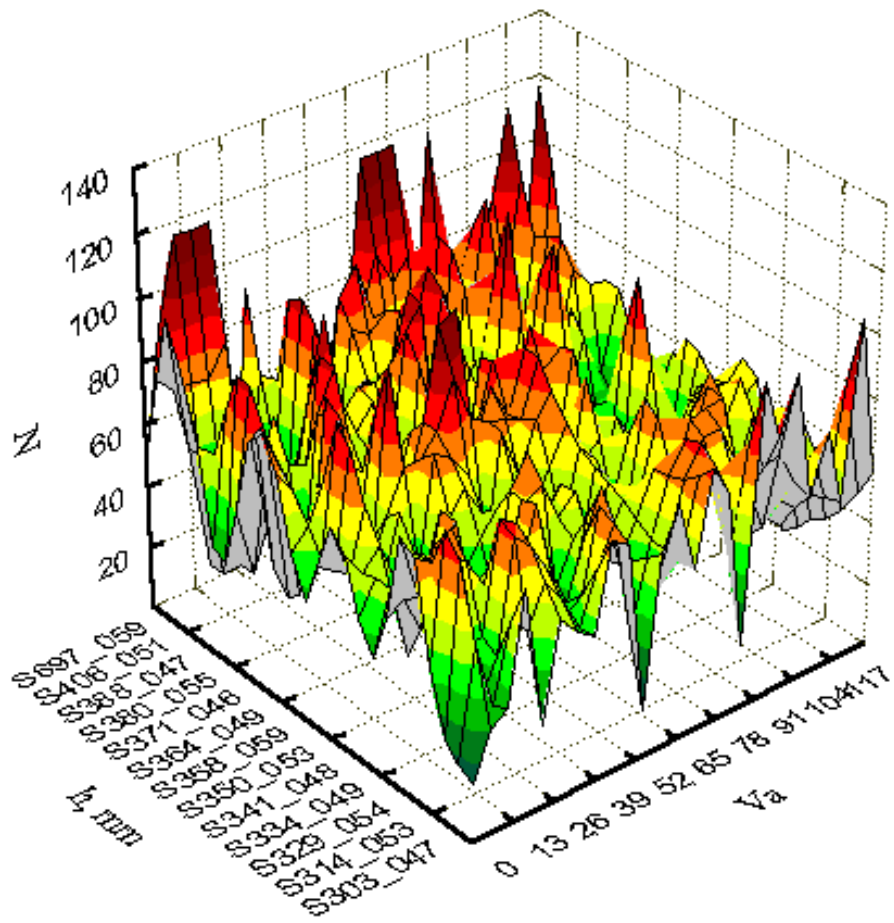


Рис.3.11. Поверхня розподілу залежності відносної амплітуди Va від зазору h в ЦПГ для кількості реалізацій N віброакустичного сигналу двигуна СМД -31А при 1000 хв$^{-1}$ (результат роботи програми STATISTICA 5).

Після обробітку всіх файлів УСМЛ створюються масиви значень діагностичних ознак (окремо фази і амплітуди) по кожному циліндру і для кожної з частот обертання колінчастого валу. Створення цих масивів здійснюють шляхом копіювання колонок “Угол максимум” і “ДП” в текстові файли. Результатом є створення файлів приведених в таблиці 3.4:

Таблиця 3.4

Назви файлів результатів обробітку сигналів за алгоритмом двостороннього контрасту

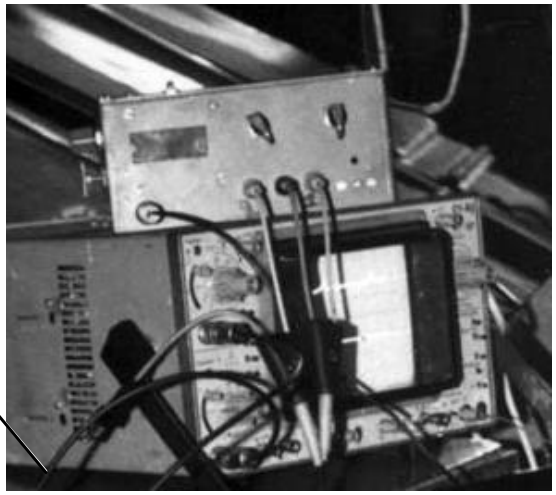
Частота обер-тання, хв$^{-1}$	Назва файлу залежностей для з’єднання			
	Фази		Відносної амплітуди	
	справного	не справного	справного	не справного
750	750f_is.txt	750f_no.txt	750a_is.txt	750a_no.txt
1000	1000f_is.txt	1000f_no.txt	1000a_is.txt	1000a_no.txt

На рис. 3.11 зображено поверхню розподілу залежності відносної амплітуди *Va* від зазору *h* в ЦПГ для кількості реалізацій *N* віброакустичного сигналу енергетичної установки при 1000 хв$^{-1}$, отриману в результаті обробітку файлу результату 1000a_is.txt за допомогою програми STATISTICA 5.1. Загальний вигляд поверхні розподілу вказує на значну складність ручного обробітку цих даних. Тому подальший обробіток базується на використанні сучасного базового програмного забезпечення ПЕОМ та розробленого.

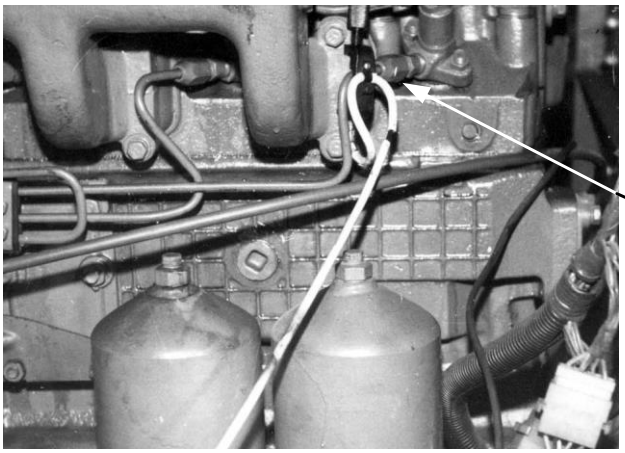
3.2.7. Методика визначення віброударних посилань при діагностуванні

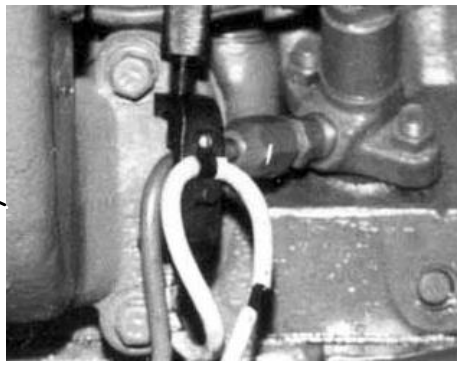
Для технічного діагностування машин в умовах експлуатації необхідні малогабаритні переносні прилади. Нами розроблено такий прилад для безрозбірного діагностування ЦПГ дизельних двигунів за віброакустичними параметрами (рис.3.12, а).

За його допомогою визначають наступні параметри двигуна.

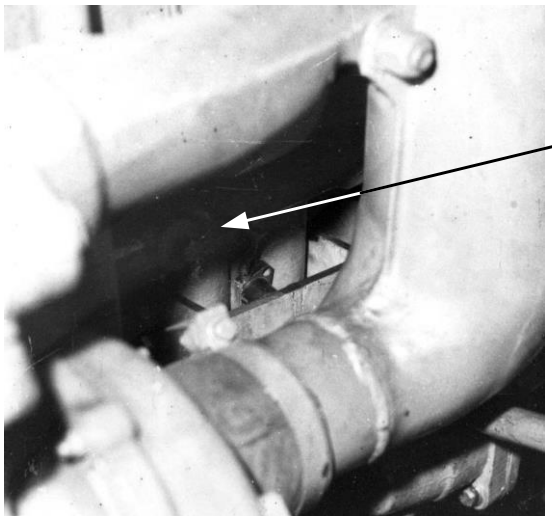


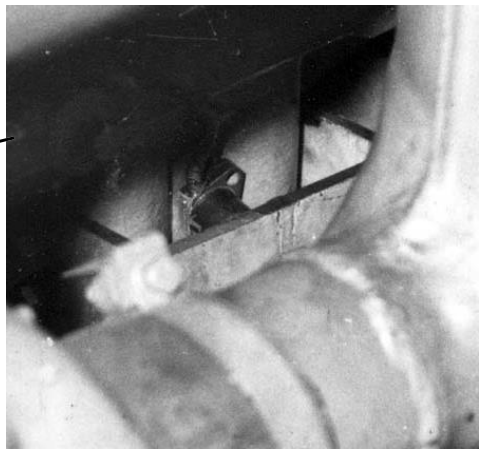
а)





б)





в)

Рис.3.12. Загальний вигляд діагностування ЦПГ розробленим приладом.
а) - зовнішній вигляд приладу;
б) - місце встановлення датчика впорскування палива;
в) - місце встановлення вібродатчика.

Основні – зазори в з'єднанні "гільза–поршень" ЦПГ двигуна за фазовими параметрами.

Додаткові – кут випередження впорскування палива окремими секціями насоса; теплові зазори газорозподільчого механізму; фази закриття клапанів газорозподільчого механізму; частоту обертання колінчастого валу.

Технічна характеристика приладу наведена в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Характеристика приладу для віброакустичного діагностування ЦПГ.

Назва показників		Кількісна характеристика
Кількість датчиків		3
Тип датчиків:	Опорної точки	Оптичний
	Синхронізації і виміру вібрації	П'єзоакселерометр
Динамічний діапазон виміру частоти обертання колінчастого валу, Гц		до 10000
Коефіцієнт підсилення віброакустичного сигналу		10…150
Кількість компараторів амплітуди, шт		10
Фаза виникнення стробу, град. п.к.в.		0…90
Тривалість стробу, ^{0} п.к.в.	при 600 хв$^{-1}$	0…75
	при 2000 хв$^{-1}$	0…40
Границя виміру зазорів в ЦПГ, мм		0,15…0,7
Частота налагодження ФВЧ і ФНЧ, Гц		70000
Габаритні розміри, мм		100x150x200
Маса, кг		не більше 0,6

Прилад розрахований на експлуатацію в умовах пункту технічного обслуговування господарств, станцій ТО, на ремонтних підприємствах, а також при проведенні наукових досліджень.

Прилад розроблено для діагностування двигунів СМД-31А, СМД-31 та СМД-23, встановлених на зернозбиральних комбайнах сімейства. При комплектуванні спеціальними пристосуваннями для кріплення датчиків є можливим використання приладу для діагностування і інших марок дизельних двигунів.

Структурна схема приладу наведена на рис.3.13. Він складається з чотирьох функціональних вузлів: вібраційного каналу–I, каналу опори –II, каналу формування початку строму – III та власне вимірювального каналу IV, виконаних з використанням інтегральних схем. Повна електронна схема всіх вузлів зображена на рис.3.14.

Вібраційний канал I служить для перетворення сигналу взаємодії спряження, яке перевіряється у вигляд, придатний для подальшого аналізу і обробітку. Він складається з віброперетворювача 1, підсилювачів 2,3, фільтру високої частоти (ФВЧ) 4, фільтра низької частоти (ФНЧ) 5 та компаратора 7.

Канал опори II (канал формування опорного імпульсу, відносно якого розглядаються часові положення всіх інших імпульсів) призначений для формування імпульсу, положення якого жорстко пов’язане з кутовим положенням колінчастого валу двигуна. Він складається з оптичного датчика 8, підсилювачів-формувачів імпульсу 9, 12, віброперетворювача (Д14) 11 та тригера 10 для виділення однієї з двох відміток ВМТ.

Канал формування строб-імпульсу – III служить для формування імпульсу довільної довжини та фази по куту повороту колінчатого валу в циклі роботи двигуна незалежно від його частоти обертання. Положення строб-імпульсу змінюється від 0 до 90^0 повороту колінчастого валу по відношенню до опорного імпульсу, виділеного в каналі опори. Цей канал складається з генератора прямокутних коливань із змінною частотою 14, одновібраторів 15 і 16. Перший із них формує початок стробу, а інший – його кінець.

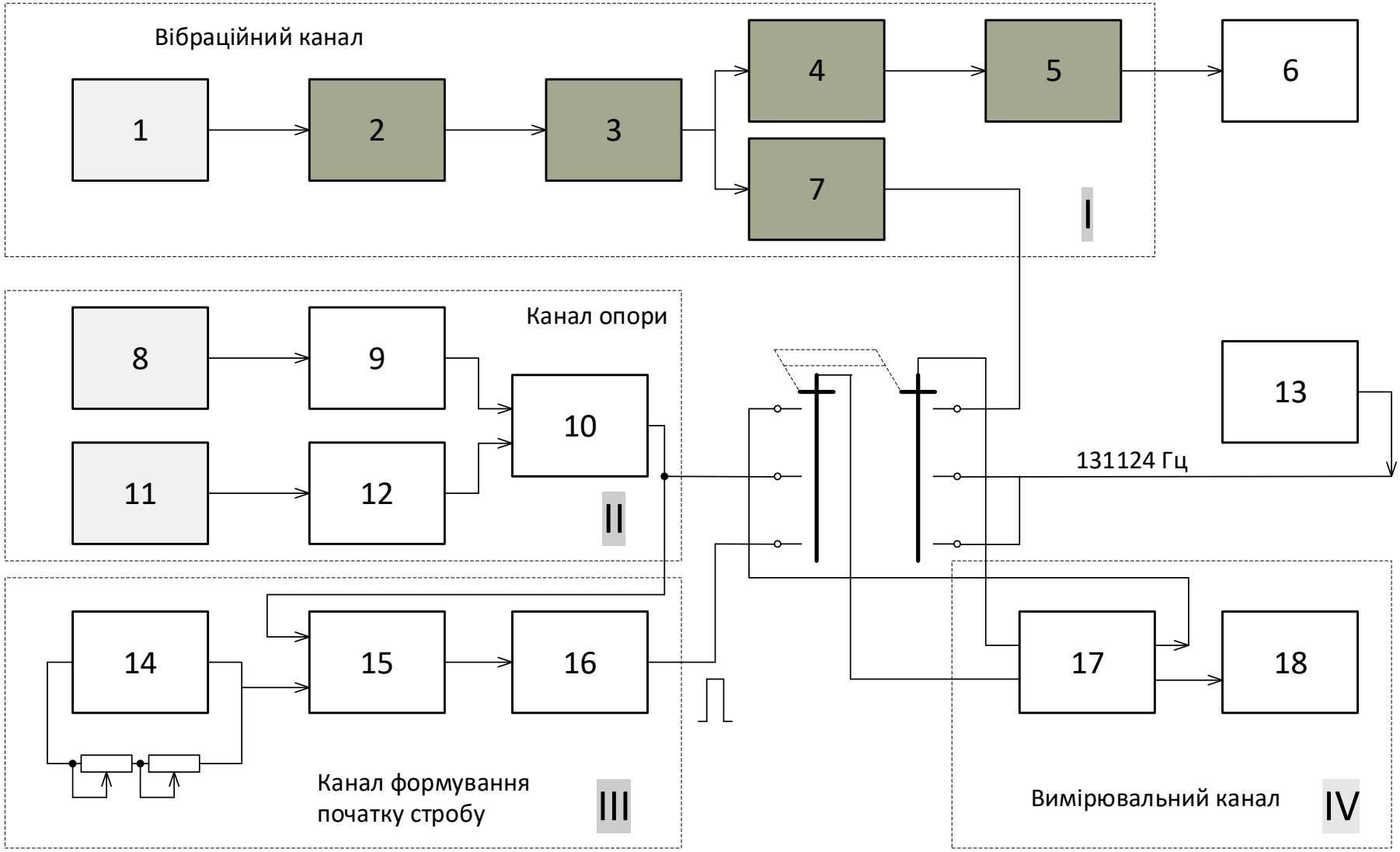


Рис.3.13. Структурна схема діагностичного приладу для вимірювання параметрів вібропроцесів в ультразвуковому діапазоні (70 кГц).

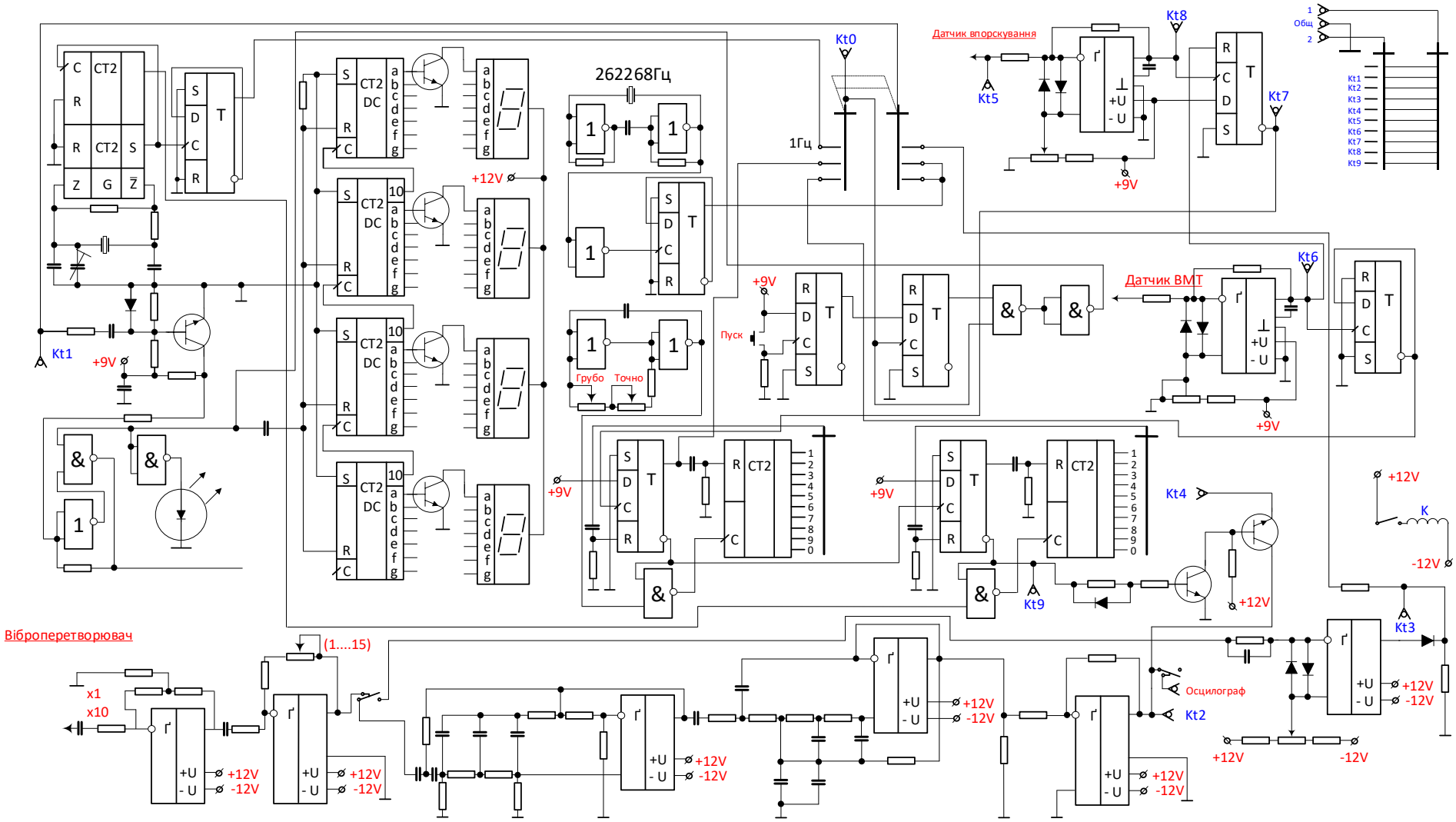


Рис.3.14. Принципова електрична схема діагностичного приладу вимірювання параметрів вібрації.

Вимірювальний канал IV призначений для вимірювання кількості імпульсів на рівнях компарації, від ВМТ до ВМТ та від ВМТ до початку строб-імпульсу. Канал складається з лічильників 17 та інформаційного табло 18.

Даний прилад дозволяє контролювати свою працездатність в контрольних точках електронної схеми. Це здійснюється за допомогою двохпроменевого осцилографа 6.

Прилад працює наступним чином. Від віброперетворювача 8 каналу опори, встановленого на відповідний паливопровід (біля форсунки) двигуна, поступають реалізації вібраційних процесів від впорскування палива. Після підсилення знімають вібраційні імпульси. Впорскування палива зосереджене у вузькому проміжку часового інтервалу і здійснюється один раз за цикл роботи двигуна. Завдяки значному відношенню корисного сигналу до перешкоди від інших секцій, в місці встановлення віброперетворювача, після компарації на відповідному рівні (4 В) в пороговій схемі отримується один імпульсний сигнал за цикл роботи, з фазовим положенням, що відповідає певним моментам циклу роботи двигуна.

Для визначення фазового параметру імпульсу в пристрої введений канал формування імпульсу опорної точки (ВМТ). Проте за цикл роботи двигуна формуються два імпульсу відмітки ВМТ. Для діагностування використовується відмітка ВМТ, після якої здійснюється “робочий хід”. Вибір потрібного імпульсу здійснюється за допомогою тригера 10, який дозволяє проходження імпульсу від оптичного датчика, коли перед ним присутній імпульс впорскування палива. Наступний імпульс ВМТ ігнорується.

Для більшості спряжень двигуна використовується часова селекція у вузькому інтервалі циклу роботи двигуна.

Для формування строб – імпульсу малої довжини (0…70° п.к.в.) та фази (0…90^0 п.к.в.) в пристрої використовується два стабільних одновібратора. Строб – імпульс формується після подачі переднього фронту імпульсу ВМТ від тригера 10. Перший одновібратор 15 формує імпульс, який з’являється через

певний проміжок часу після запуску. Широкий інтервал регулювання довжини затримки подачі сигналу обумовлений можливістю переналагодження частоти опорного генератора 14 та ступінчастої зміни коефіцієнта ділення лічильника. Одновібратор 16 виконано за такою ж схемою, тільки запуск його здійснюється від імпульсу першого одновібратора. Він формує кінець строб імпульсу. При цьому в пристрої передбачено ступінчасте регулювання довжини стробу (10 положень).

Від віброперетворювача і вібраційного каналу, встановленого в дефектній зоні двигуна, реалізації сигналу поступають на підсилювач 2, де й підсилюються по амплітуді в 10 раз. Далі сигнал проходить на підсилювач 3 (плавна зміна коефіцієнта підсилення від 1 до 15). Підсилена до потрібного рівня реалізація віброакустичного сигналу може бути подана на фільтр високої частоти другого порядку, а далі – на фільтр низької частоти. Обидва фільтра налагоджені на частоту 70 кГц. На подвійній частоті зрізу фільтри ослабляють вихідний сигнал на 52 дБ. Після фільтрації вібросигнал поступає для відображення на осцилограф.

Підсилений сигнал може також подаватись на компаратор рівня 7, а після нього для підрахунку кількості імпульсів на різних рівнях компарації – до вимірювального каналу. Цю частину приладу розроблено для досліджень спектральної щільності процесів дизельного двигуна. Генератор 13 виробляє стабілізовану частоту імпульсів 131124 Гц, які почергово заповнюють простір від ВМТ до ВМТ, або ж від ВМТ до початку строб–імпульсу.

Для діагностування ЦПГ дизельних енергетичних установок за допомогою розробленого приладу встановлюють датчики на відповідні місця.

Датчик вібрації 1 встановлюють на блок циліндрів, за допомогою пристосування чи шпильки, які входять в комплект, на той циліндр, який досліджується (рис.3.12., б).

Датчик вібрації каналу опори встановлюють на паливопровод біля форсунки відповідного циліндра (рис.3.12, в).

Для встановлення оптичного датчика ВМТ встановлюють перший циліндр у ВМТ на такті стиснення. На шків приводу насосу гідростатичної трансмісії (ГСТ) закріплюють відмітник ВМТ (пластину). Суміщають кромку пластини з поділкою на датчику.

Під'єднують всі датчики до приладу, а прилад – до джерела живлення.

Запускають двигун та прогрівши його до робочої температури, починають діагностування в такій послідовності:

- встановлюють галетний перемикач в 2 положення (ВМТ);
- впевнюються в правильності функціонування каналів опори та формування стробу;
- подавши на один із входів осцилографа відфільтрований сигнал віброперетворювача, а на інший вхід – стробуючий імпульс, добиваються повного співпадання початку стробу із максимумом енергії сигналу віброакустичної реалізації;
- натискуючи на кнопку "Пуск" проводять 10 замірів та обчислюють середнє значення;
- переключають галетний перемикач у 3 положення "Строб" і натискуючи на кнопку "Пуск" роблять також 10 замірів.

Для знаходження фази виникнення віброударного посилання від перекладки поршня використовують формулу:

$$\phi = \frac{n_{строб}}{n_{ВМТ}} \cdot 360, \qquad (3.9)$$

де ϕ – фаза ударного імпульсу;

$n_{строб}$ – середня кількість імпульсів між ВМТ та початком стробу;

$n_{ВМТ}$ – кількість імпульсів між ВМТ і ВМТ.

3.2.8. Методика непараметричного синтезу методу прийняття рішення з визначенням достовірності діагнозу

Для вирішення задачі синтезу методу прийняття рішення, відносно діагностування ЦПГ за фазою виникнення віброударного посилання від

перекладки поршня, нами розроблена математична модель та програма на мові MathCad2000 (додаток Е). Теоретичні основи математичної моделі наведені у розділі 2 (підрозділ 2.3).

Для вхідних параметрів роботи програми визначення достовірності діагнозу використовуються створені матриці розподілу реалізацій фази та амплітуди виникнення удару для справного I та несправного N з'єднань (табл.3.4). При цьому вводяться такі умовні позначення:

$I_f_{i,j}$, $N_f_{i,j}$ – матриці розподілу реалізацій фази;

$I_a_{i,j}$, $N_a_{i,j}$ – матриці розподілу реалізацій амплітуди;

i – кількість реалізацій сигналу для справного і несправного з'єднань (при 750 хв$^{-1}$ – $i = 60$, при 1000 – $i = 127$);

j – кількість об'єктів діагностування для справного ($j = 13$) і несправного ($j = 11$) з'єднань.

Далі формують відповідні матриці навчальної ($Moi_{i,j}$, $Mon_{i,j}$) та екзаменаційної ($Mei_{i,j}$, $Men_{i,j}$) послідовності, виходячи з кількості реалізацій для навчання. Оптимальна кількість реалізацій для навчання вибирається виходячи з умови забезпечення мінімуму помилок першого α та другого β видів. Вона становить 30 реалізацій. Для цього вхідну матрицю розбивають на дві. Першу ($i = 0 \ldots 30$) використовують для навчання, а другу ($i = 30 \ldots N_{\max}$) для екзамену.

Визначення законів розподілу щільності вірогідності векторів діагностичної ознаки по навчальній виборці проводять за методом гістограм. Для реалізації методу простір ознак розбивають на ряд комірок G_j, які взаємно перетинаються. Тоді оцінки законів розподілу щільності вірогідності діагностичної ознаки для класів визначають за залежностями:

$$W(\vec{x}/D) = \frac{N_{G_j}}{N \cdot \Delta x}, \qquad (3.10)$$

де N_{G_j} – кількість об'єктів навчальної послідовності (для справного чи несправного з'єднання ;

N – загальна кількість елементів навчальної послідовності;

Δx – ширина комірки.

Використовуючи залежність (3.1) створюють вектори розподілу M1 і A1 відповідно для справного і несправного з'єднань ЦПГ.

Величини відношень правдоподібності знаходять користуючись залежністю (2.89). Після знаходження останніх визначають натуральні логарифми цих відношень.

Проводять навчання системи за отриманими значеннями $\ln L(x_i \ldots x_{n_{\max}})$ для справного і несправного її стану.

Для проведення екзамену за сформованими матрицями екзаменаційних послідовностей формують проміжні матриці $\ln i_{i,j}$, $\ln n_{i,j}$ у яких елементи матриць замінюють на відповідні їм логарифми для відповідних діапазонів розподілу. Значення відповідних логарифмів вибирають із вектора логарифму відношення правдоподібності LnL. Для цього використовують наступний алгоритм:

- беруть *i*-й елемент екзаменаційної послідовності $Mei_{i,j}$ ($Men_{i,j}$);
- за величиною *i*-го елементу екзаменаційної послідовності визначають номер комірки вектора M1 (A1) до якого відноситься даний елемент;
- за даним номером вибирають значення логарифму відношення правдоподібності із вектора LnL;
- замінюють *i*-й елемент екзаменаційної послідовності значенням визначеного логарифму;
- беруть *i+1*-й елемент екзаменаційної послідовності і т.д. до останнього елементу екзаменаційної послідовності.

Наступний етап полягає у прийнятті рішень за правилом (2.98) для справного і несправного станів системи. Для цього користуються алгоритмом:

- беруть *i*-й елемент матриці $\ln i_{i,j}$($\ln n_{i,j}$) і порівнюють з натуральними логарифмами порогів C1 і C0;
- якщо значення *i*-го елементу > lnC1 то його значенню привласнюється значення =1;
- якщо значення *i*-го елементу < lnC0 то його значенню привласнюється значення =0;

– якщо значення *i*-го елементу >lnC0, але < lnC1, тоді беруть наступний елемент $\ln i_{i+1,j}$ і сумують його з попереднім $\ln i_{i,j}$ елементом і проводять порівняння з натуральними логарифмами порогів C1 і C0;

– дане сумування проводять не більше n_{max} раз після якого, якщо рішення не прийнято порівнюють значення $\sum_{i=0}^{n_{\max}} \ln L(x_i \ldots x_{\max})$ з lnC;

– якщо значення *i*-го елементу > lnC то його значенню привласнюється значення =1;

– якщо значення *i*-го елементу < lnC то його значенню привласнюється значення =0;

Результатом роботи програми за даним алгоритмом є матриця $End_i_{i,j}$ ($End_n_{i,j}$), елементи якої складаються із 0 і 1.

Визначають значення помилок першого і другого видів за залежністю (2.93).

3.2.9. Методика визначення залишкового ресурсу за фазовими параметрами віброударних посилань

Для визначення залишкового ресурсу встановлюється функціональна залежність фазового параметру виникнення віброударного посилання від наробітку дизельного двигуна $T = f(\phi)$. Встановлення даної функціо-нальної залежності проводиться шляхом визначення поліноміальної регресії векторів експериментальних даних $\vec{vz}$ – значення фази та $\vec{vy}$ – значення наробітку (додаток Ж).

Для визначення закону розподілу випадкової величини наробітку необхідно встановити обсяг вибірки. Відомо, що обсяг вибірки *N* залежить від потрібної вірогідності *P(t)* безвідмовної роботи протягом певного часу *t* з довірчою вірогідністю α [91].

Так як на початку досліджень закон розподілу невідомий, використовують непараметричний метод визначення обсягу вибірки, який встановлює функціональну залежність між зазначеними показниками:

$$N = \frac{ln(1-\alpha)}{ln(P(t))}. \qquad (3.11)$$

При прийнятих значеннях $P(t) = 0.9$, $\alpha = 0.99$ значення $N = 44$.

Для прийнятої кількості об'єктів досліджень на межі граничного спрацювання ЦПГ визначався закон розподілу наробітку методом гістограм. Після визначення закону наробітку проводять вирівнювання емпіричного розподілу і порівняння емпіричної і теоретичних функцій розподілу за критерієм Колмогорова.

Для встановленого теоретичного закону розподілу визначають математичне очікування та середньоквадратичне відхилення. За отриманими значеннями будується номограма для визначення залишкового ресурсу.

Ресурс залежить від багатьох факторів сукупність яких ніколи не повторюється, тому визначення залишкового ресурсу за допомогою номограми містить в собі деяку незручність, так як їй притаманна дискретність. Підвищення точності прогнозування можливе при умові використання ПЕОМ. Тому нами розроблено програми для індивідуального прогнозування залишкового ресурсу. Перша програма написана на мові MathCad2010Pro (додаток Ж), а друга на мові Delphi 5 (додаток З).

Вхідними параметрами роботи програм є фаза – Faza та наробіток на момент діагностування–Td.

Алгоритм роботи даної програми наступний:

- виходячи з рівняння регресії створюється вектор фази – *Ф*;
- вводяться дані діагностування Faza, та Td;
- визначається порядковий номер *i* елемента вектора *Ф* за мінімумом різниці $min(\Phi_i - Faza)$;
- для знайденого елемента вектора *Ф* знаходиться значення середнього наробітку у векторі Tsr_i;
- знаходиться коефіцієнт інтенсивності зношення за залежністю

$$\kappa_{інт} = \frac{Tsr_i}{Td}; \qquad (3.12)$$

- визначається індивідуальний закон зношення ЦПГ – $D_i = \frac{Tsr_i}{\kappa_{інт}}$; (3.13)

– виходячи з 3σ визначається мінімальний і максимальний залишковий ресурс.

Дана програма індивідуального прогнозування залишкового ресурсу наведена в додатку Ж.

Для статистичного обробітку експериментальних даних використовувалися пакети STATISTICA 10 та Microsoft Excel 2010.

Статистичний обробіток експериментальних даних полягав у визначені математичного очікування, середнього та середньоквадратичного відхилення коефіцієнтів варіації та кореляції Пірсона, дисперсії та ексцесу масивів діагностичних ознак фази, відносної амплітуди, даних теоретичних розрахунків та експериментальних даних наробітку двигунів. Інше завдання статистичного обробітку полягає у визначені рівнянь регресії оброблених даних.

Зазначені параметри розраховувались за залежностями:

– *математичне очікування МО* ($\bar{x}$);

$$MO = \frac{\sum x_i}{n}, \tag{3.14}$$

де $\sum x_i$ –сума поточних значень випадкової величини для даної вибірки;

n –об'єм вибірки.

– *середнє відхилення* $\bar{\delta}$;

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n}\sum x - \bar{x}, \tag{3.15}$$

– *середньоквадратичне відхилення* σ;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum\left(x - \bar{x}\right)}{n-1}}, \tag{3.16}$$

– *коефіцієнт варіації* ν;

$$\nu = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \tag{3.17}$$

– *коефіцієнт кореляції Пірсона* r;

$$r = \frac{n \cdot \left(\sum xy\right) - \left(\sum x\right) \cdot \left(\sum y\right)}{\sqrt{\left[n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2\right] \cdot \left[n\sum y^2 - \left(\sum y\right)^2\right]}}, \tag{3.18}$$

де x, y –відповідно перший і другий масив;

– *дисперсія* D;

$$D = \frac{n \cdot \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}{n(n-1)}, \tag{3.19}$$

– *ексцес* E;

$$E = \left[\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot \sum\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)^4\right] - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \tag{3.20}$$

Всі рівняння вмонтовані в базові статистичні програми зазначені вище.

Визначення рівнянь регресії експериментальних даних проводилися за допомогою вмонтованих функцій пакетів STATISTICA 12 та MathCad2010Pro.

РОЗДІЛ IV
РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Залежність фази виникнення віброударного посилання від зазору в циліндро-поршневій групі дизельних двигунів

Для визначення залежності фази виникнення віброударного посилання від зазору використовувалася математична модель розглянута у розділі 2 та методично у розділі 3.

Вибір швидкісного режиму діагностування проводився шляхом моделювання різної частоти обертання колінчастого валу двигуна. Приймалися наступні частоти обертання – 750, 1000, 1250, 1500, 1750 та 2000 хв$^{-1}$ (додаток И).

На основі даних розрахунків були отримані графічні залежності фази виникнення удару від зазору і обертів двигуна та поверхні розподілу фази та швидкості в момент удару рис.4.1, 4.2.

Як показують розрахунки із збільшенням частоти обертання фаза виникнення удару зменшується, а поперечна швидкість поршня у момент удару зростає. Це пояснюється збільшенням циклової подачі палива в циліндр і, як наслідок значним підвищенням швидкості наростання тиску в циліндрі та бокової сили N, яка і викликає удар. Тому один і той же шлях, яким є зазор, проходиться за менший проміжок часу.

Із збільшенням зазору (рис.4.1) фаза виникнення удару по відношенню до опорної точки зростає. Інтенсивність зростання фази від збільшення зазору для різних обертів двигуна різна. З більшою інтенсивністю фаза зростає на менших обертах, тобто має найбільший приріст. Це призводить до збільшення зони роботоздатного стану двигуна. Так зона роботоздатного стану $\Delta\varphi$ для 750 хв$^{-1}$ становить більше 6^0 тоді ж як для 2000 – близько $3{,}5^0$. Таким чином вибір діагностичної частоти обертання колінчастого валу частково здійснювався на етапі теоретичних розрахунків. Вибір частоти близької до номінального режиму роботи двигуна призвело б до

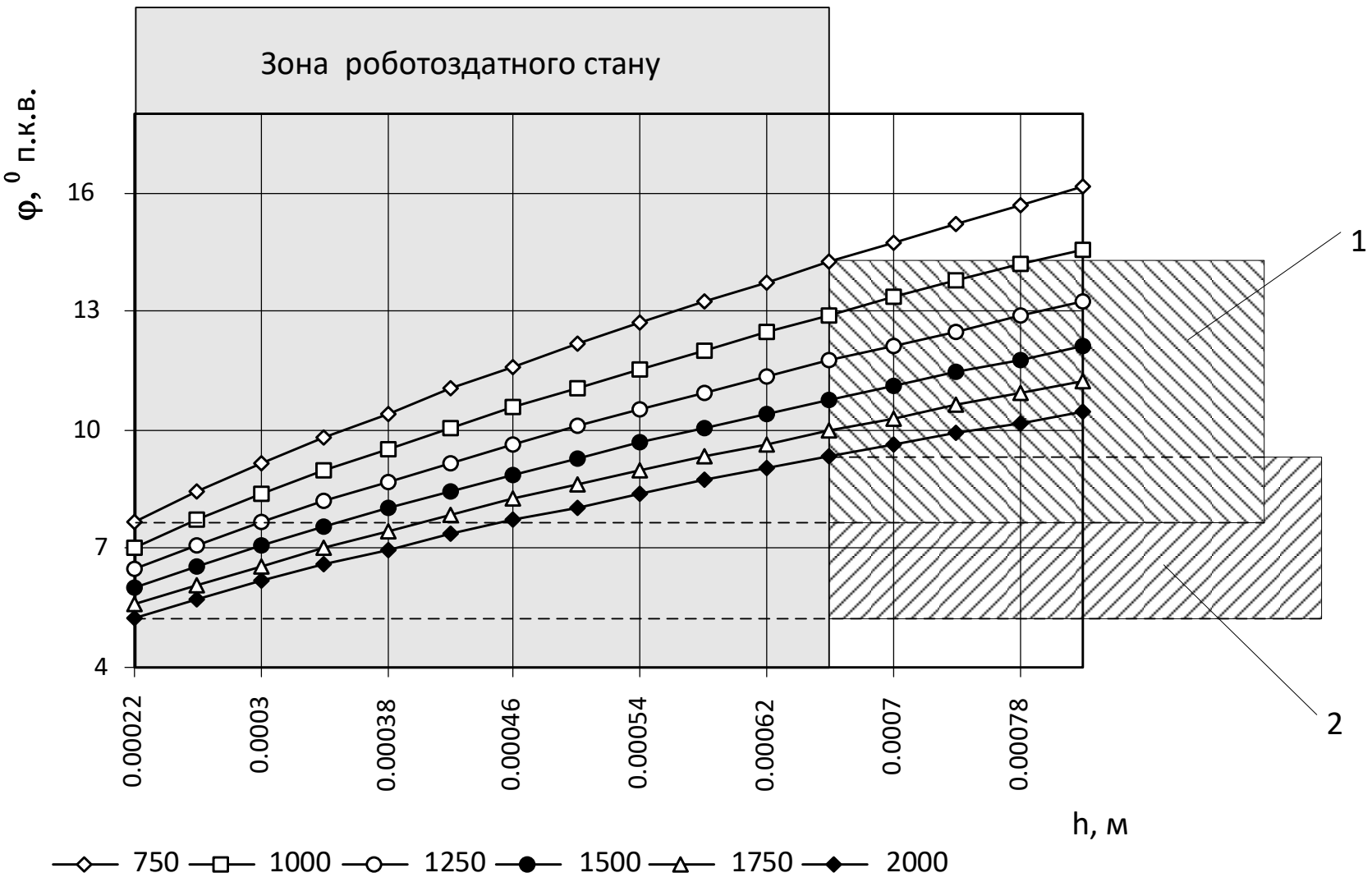
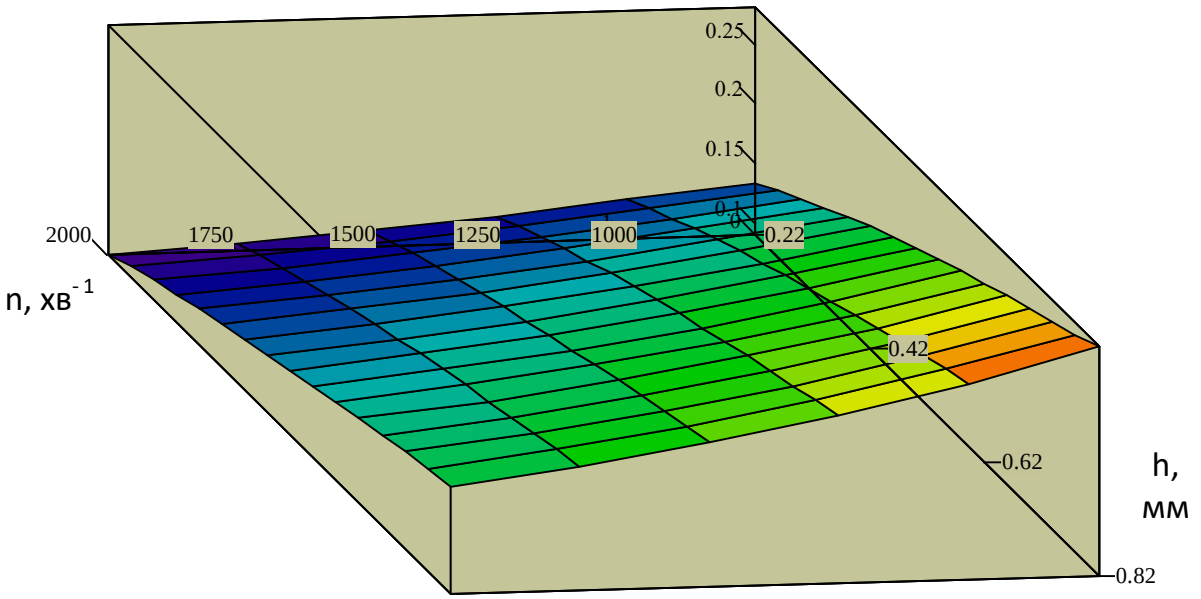


Рис.4.1. Теоретичні залежності фази виникнення віброударного посилання від зазору в ЦПГ.
1-Зона роботоздатного стану за структурним параметром при 750 хв-1
2-Зона роботоздатного стану за структурним параметром при 2000 хв-1



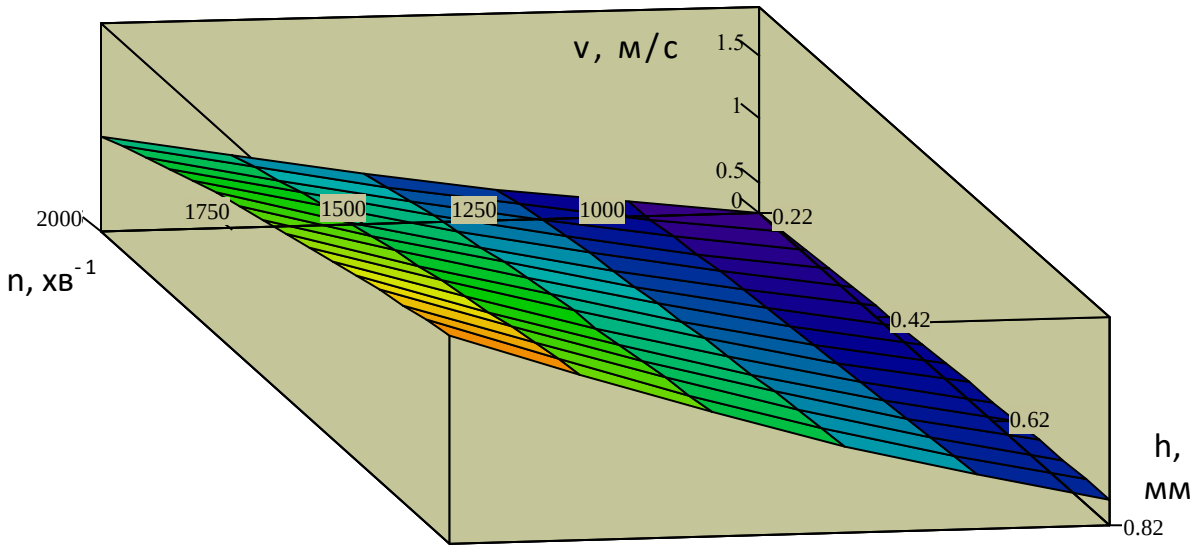


Рис.4.2. Поверхні розподілу фази φ та швидкості в момент удару v від зазору в ЦПГ- h на різних швидкісних режимах роботи дизеля СМД-31А.

невиправдано різкого підвищення вимог стосовно дискретності (чутливості) діагностичного засобу, що в решті решт спричинить підвищення його вартості і зниження точності постановки діагнозу. Щоб якоюсь мірою позбутися перерахованих недоліків нами вибрано на початковому етапі за діагностичну частоту –750 хв$^{-1}$.

Протилежну характеристику, в порівнянні із фазою, має поперечна швидкість поршня в момент удару (рис4.2 *б*). Тобто, підвищення швидкості в момент удару відбувається при збільшенні як частоти обертання колінчастого валу дизельного двигуна, так і при збільшенні зазору. При цьому приріст швидкості Δv при 750 хв-1 становить 0,14, а при 2000 – 0,65 м/с.

Звернувши увагу на характеристики кривих фази та швидкості в момент удару можна відмітити майже лінійний характер цих кривих. Для спрощеного визначення фази виникнення віброударного посилання викликаного перекладкою поршня і швидкості в момент удару були визначені рівняння лінійної регресії теоретичних даних. Графіки лінійних регресій фази приведені на рис.4.3.

Рівняння регресії фази від зазору має вигляд:

для 750 хв$^{-1}$

$$\phi(h) = 5.03 + 13.924 \cdot h, \qquad (4.1)$$

для 1000 хв$^{-1}$

$$\phi(h) = 4.703 + 12.37 \cdot h. \qquad (4.2)$$

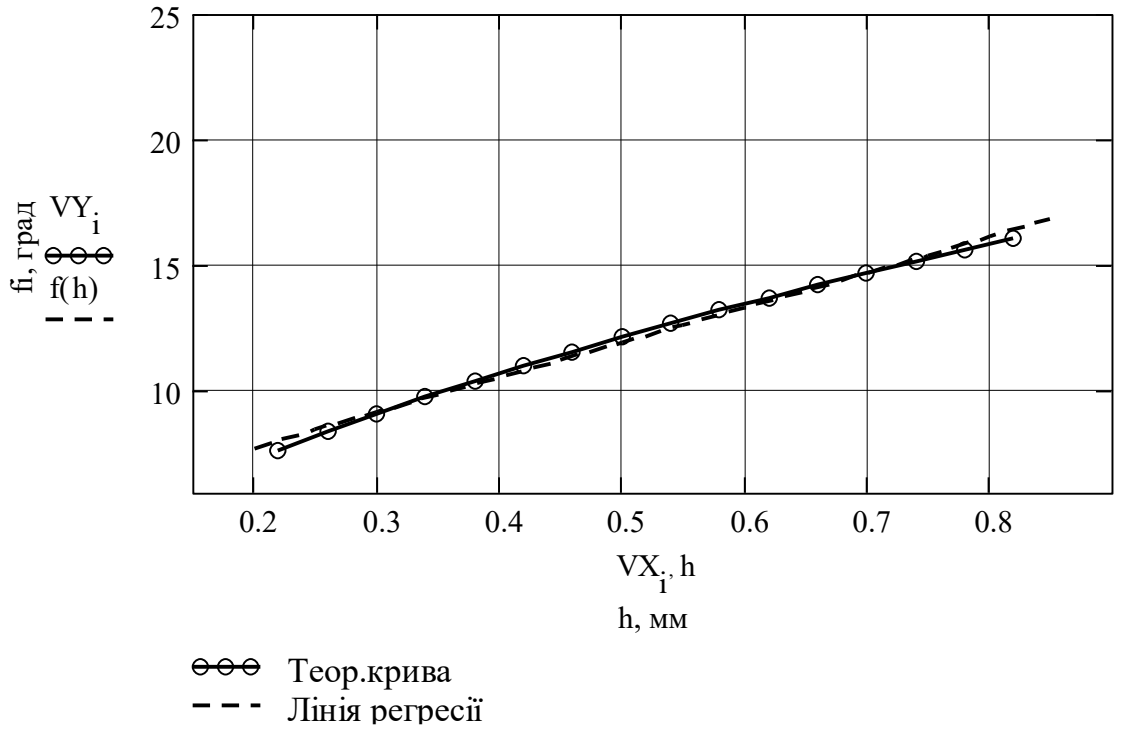
Коефіцієнт кореляції значень рівняння лінійної регресії фази і теоретичних розрахунків становить 0,997 для обох частот колінчатого валу.

Рівняння регресії швидкості в момент удару відповідно:

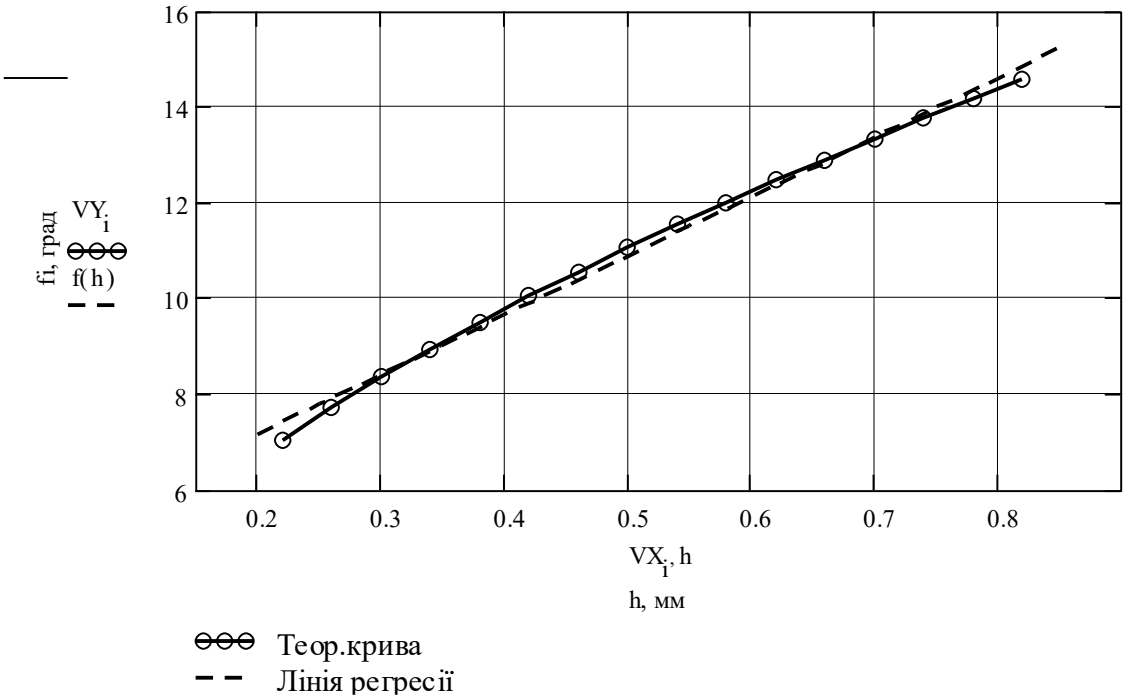
для 750^{-1}

$$v(h) = 0.2 + 0.326 \cdot h, \qquad (4.3)$$

для 1000 хв$^{-1}$



а)



б)

Рис.4.3. Лінійна регресія залежностей фази виникнення віброакустичного посилання $\phi(h)$ від зазору між поршнем і гільзою для двигуна СМД - 31А при:
а - 750 , б - 1000 хв$^{-1}$.

$$v(h) = 0.286 + 0.4924 \cdot h. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт кореляції значень рівняння лінійної регресії швидкості і теоретичних розрахунків становить 0,995 для обох частот колінчатого валу.

Для експериментального підтвердження теоретичних положень були проведені лабораторні випробовування. Лабораторні випробовування виконувалися шляхом моделювання різних зазорів в ЦПГ двигуна СМД-31А, з метою формування масиву залежності фази та відносної амплітуди віброакустичного посилання. І хоча за головний діагностичний параметр прийнята фаза, паралельно досліджувалася і відносна амплітуда віброакустичного посилання. Термін відносна передбачає відношення подвоєного математичного очікування центрального вікна до суми математичних очікувань бокових вікон. Дана величина є безрозмірною.

Як зазначалося в розділі 3.2.7 результатом роботи програми обробітку сигналів за алгоритмом двостороннього контрасту було створення масивів залежностей фази та відносної амплітуди віброударних посилань від різних значень зазору в з'єднанні "поршень-гільза". Створені масиви для 1000 хв$^{-1}$ приведені в додатку К. Аналогічно були створені масиви для 750 хв$^{-1}$. Усереднені дані по масивах наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Усереднені значення фази та відносної амплітуди віброімпульсу

№ експе-римент у	Зазор, мм	Значення параметрів при різних частотах обертання колінчастого валу			
		Фази		Відносної амплітуди	
		750	1000	750	1000
exp#370	0.46	12.795	12.093	35.619	53.38
exp#302	0.47	13.044	12.202	39.077	57.985
exp#387	0.47	13.069	12.312	37.077	55.044
exp#340	0.48	13.486	12.336	36.086	54.294
exp#333	0.49	12.846	12.406	38.831	55.74
exp#363	0.49	13.336	12.479	39.143	54.416

Продовження табл.4.1

exp#405	0.51	13.822	12.601	36.432	58.774
exp#313	0.53	13.871	12.799	48.513	59.037
exp#349	0.53	13.971	12.807	41.898	59.1
exp#328	0.54	14.218	12.927	47.127	59.037
exp#379	0.55	14.23	13.044	47.628	63.018
exp#696	0.59	14.589	13.419	50.781	68.287
exp#357	0.59	14.676	13.537	53.364	68.243
exp#889	0.81	18.498	16.129	70.754	86.349
exp#633	0.81	18.149	15.954	73.548	88.026
exp#607	0.82	18.262	16.412	78.256	90.735
exp#611	0.82	18.435	16.426	72.747	92.571
exp#700	0.82	18.588	16.241	69.264	92.135
exp#728	0.82	18.561	16.599	71.271	91.726
exp#861	0.82	18.388	16.533	73.512	88.612
exp#877	0.82	18.761	16.484	67.273	89.377
exp#692	1.09	22.778	19.704	84.094	103.418
exp#716	1.13	23.008	20.209	87.964	104.477
exp#720	1.13	23.905	20.312	92.265	106.835

Для даних наведених в додатку К визначалася дисперсія окремо для фази і окремо для відносної амплітуди при 750 і 1000 хв$^{-1}$. Дані такого статистичного обробітку наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Значення дисперсії експериментальних даних фази та відносної амплітуди.

Зазор в циліндрі	Значення дисперсії експериментальних даних			
	750 хв$^{-1}$		1000 хв$^{-1}$	
	фаза	відносна ампл.	фаза	відносна ампл.
<0.64 мм	3.3	329.43	2.327	352.72
>0.64 мм	2.87	985.46	3.227	939
середнє	3.085	657.445	2.777	645.86

Дані параметри дисперсій, підтверджують правильність вибору частоти діагностування – 1000 хв$^{-1}$. І хоча дані дисперсій для деяких параметрів кращі при 750 хв$^{-1}$, однак усереднені значення мають менші відхилення для частоти 1000 хв$^{-1}$. Це пояснюється тим, що на мінімальних обертах роботи двигуна не стабільно працює паливна апаратура і, як наслідок нерівномірні значення має сила газів – основна складова рівняння радіального переміщення поршня.

Отримані експериментальні дані апроксимуются складними нелінійними рівняннями (рис.4.4).

Для 750 хв$^{-1}$:

– фаза

$$\phi(h) = 7.711 \cdot \left(e^h - \frac{1}{h} \cdot ln(h) \right) + \frac{31.664}{h^{0.4}} - \frac{23.863}{tanh(h)}, \qquad (4.5)$$

– амплітуда

$$A(h) = 3.548 \cdot (ln(h) + 1.5) - 15.748 \cdot \left[\frac{(2 \cdot e)^h - ln(h)}{h + 0.15 \cdot e^h} \right] + 2.3 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{e^h - ln(h)}{h + 2} \right), \qquad (4.6)$$

Для 1000 хв$^{-1}$:

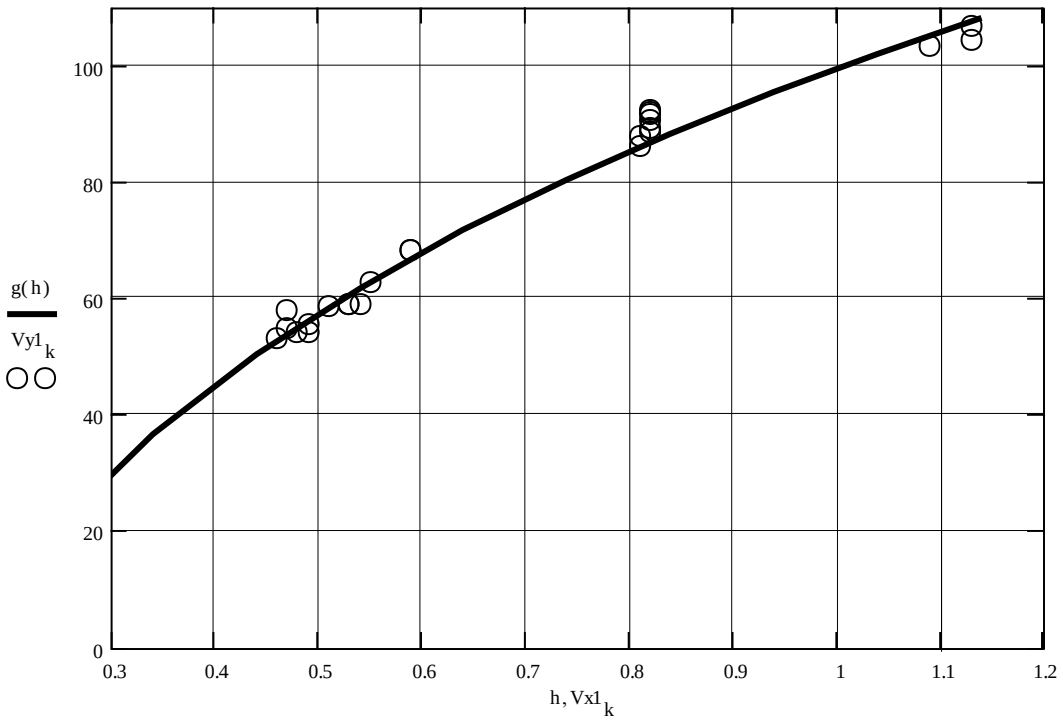
– фаза

$$\phi(h) = 9 \cdot ln(h) + \frac{7.342}{h + 0.25} \cdot e^{h+0.15}, \qquad (4.7)$$

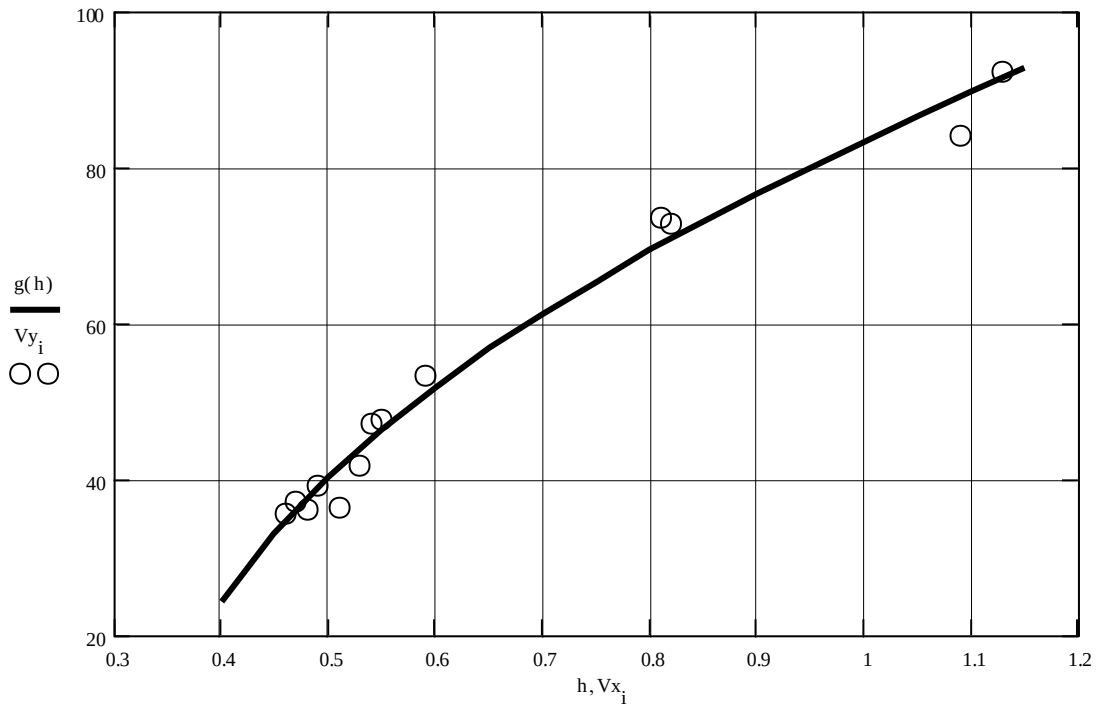
– амплітуда

$$A(h) = 81.078(ln(h) + 1) + \left(\frac{21.17}{h + 0.15} \right), \qquad (4.8)$$

Дані рівняння можна використовувати для точних розрахунків, однак використання їх в умовах експлуатації пов’язане з деякими труднощами розрахункового характеру. Тому за отриманими даними були побудовані графіки лінійної регресії наведені на рис 4.5, 4.6. Використання лінійної регресії дозволить в умовах рядової експлуатації позбутися даних недоліків при незначній похибці визначення.

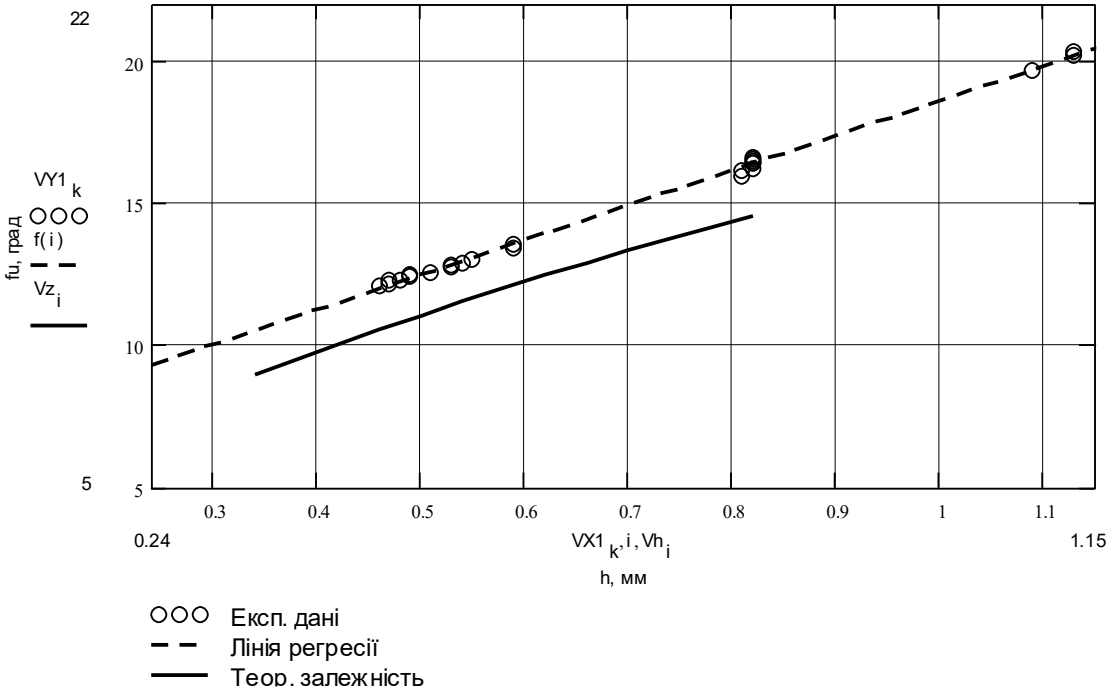


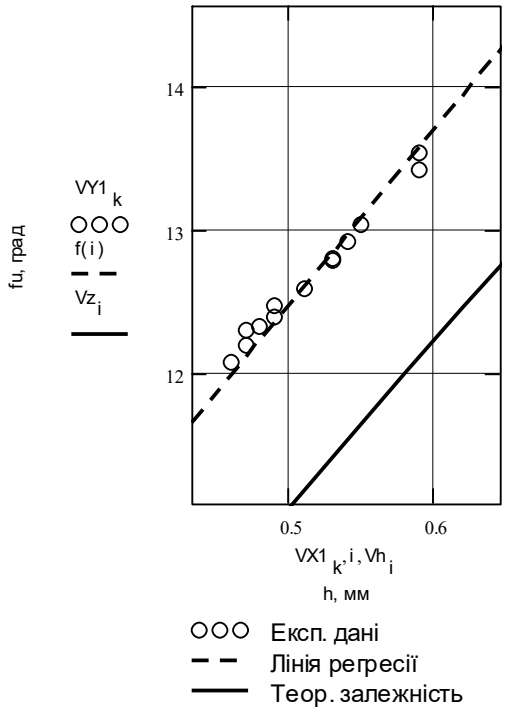
а)

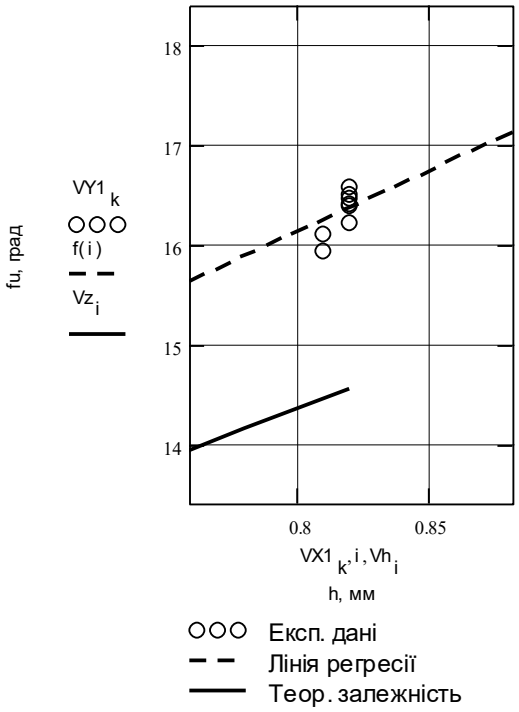


б)

Рис.4.4. Графік не лінійної регресії експериментальних даних відносної амплітуди ЦПГ двигуна СМД-31А при :
а) - 1000 хв$^{-1}$, б) - 750 хв$^{-1}$.

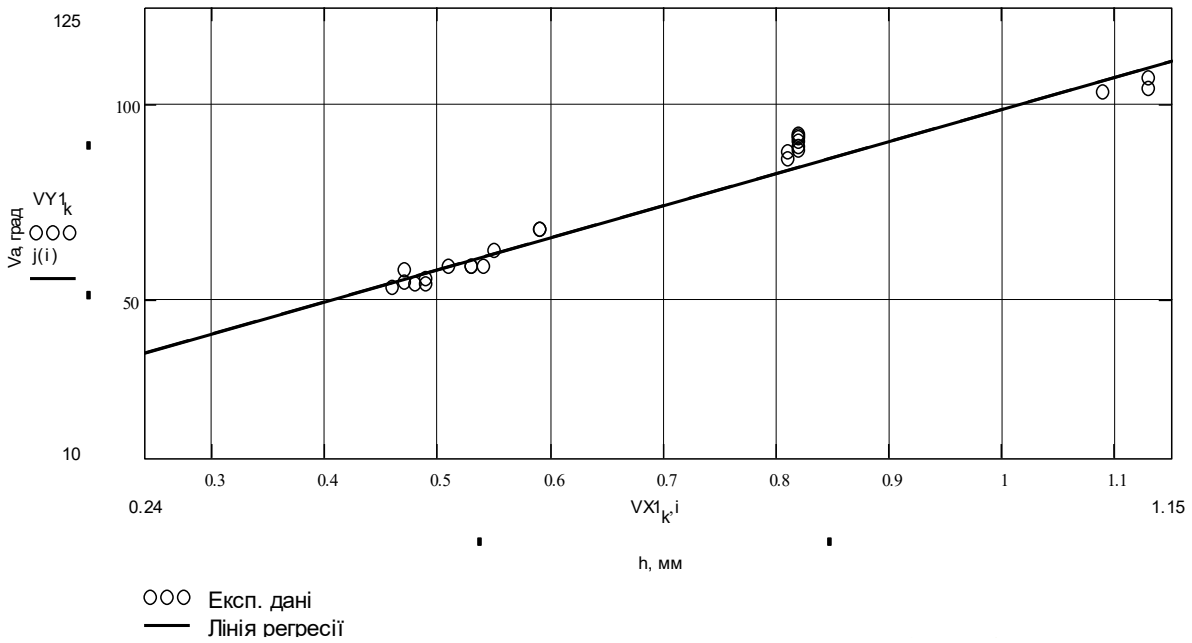


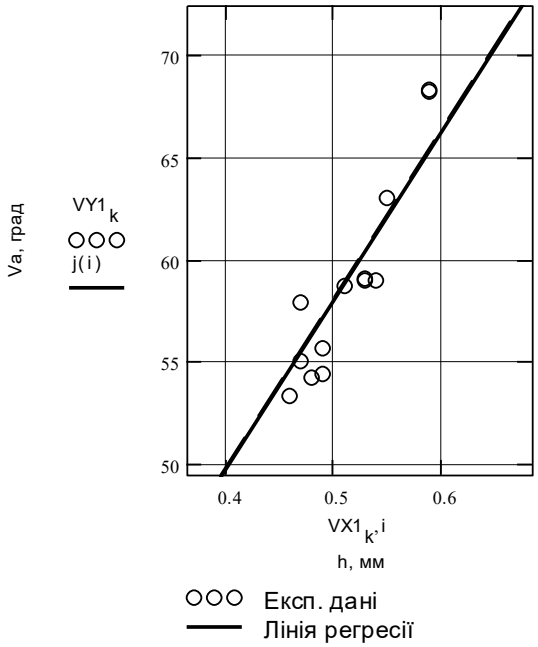


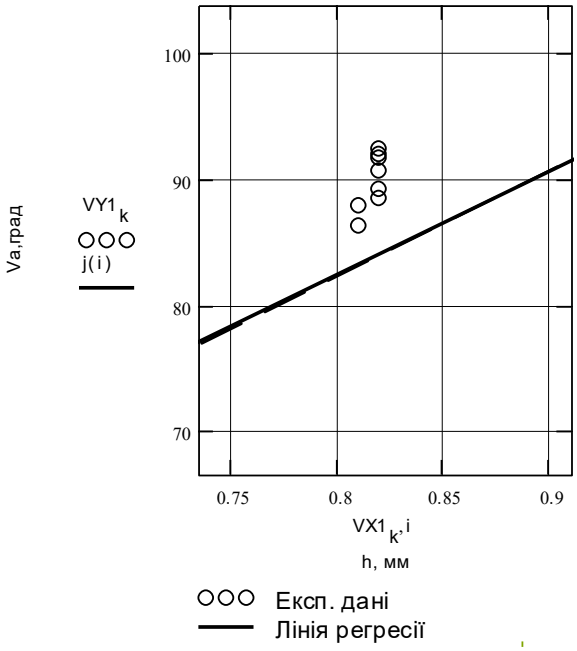


а б

Рис.4.5. Графік лінійної регресії експериментальних даних та теоретична залежність фази віброударних посилань двигуна СМД-31А при 1000 хв$^{-1}$: а, б - масштабування по зазору







а) б)

Рис.4.6. Графік лінійної регресії експериментальних даних амплітуди віброударних посилань двигуна СМД-31А при 1000 хв $^{-1}$:
а, б - масштабування по зазору

Аналізуючи дані графіки можна відмітити схожість кута нахилу експериментальних і теоретичних прямих. Ця схожість говорить про повноту математичної моделі, яку можна використовувати для розрахунку фази виникнення віброударних посилань інших рядних дизельних двигунів. Розбіжність же зазначених кривих пояснюється сталою величиною затримки смугового ультразвукового фільтру. Дана затримка становить для 750 хв$^{-1}$ – 1,18^{0}, а при 1000хв$^{-1}$ відповідно 1,53^{0} п.к.в. В загальному ж дана затримка незмінна і в часовому еквіваленті становить $0.26 \cdot 10^{-3} c$, що завжди може бути враховано при теоретичному розрахунку інших двигунів.

Розглядаючи візуально масштабування по зазору кращу купчастість має параметр фази. Це підтверджує експериментальні дослідження Ждановського Н.С [48].

Рівняння лінійної регресії експериментальних даних мають вигляд:

Для 750 хв$^{-1}$:

– фаза

$$\phi(h) = 5.539 + 15.922 \cdot h; \tag{4.9}$$

– відносна амплітуда

$$A(h) = -0.813 + 83.541 \cdot h. \tag{4.10}$$

Для 1000 хв$^{-1}$:

– фаза

$$\phi(h) = 6.398 + 12.193 \cdot h; \tag{4.11}$$

– відносна амплітуда

$$A(h) = 17.101 + 81.753 \cdot h. \tag{4.12}$$

Тіснота зв’язку експериментальних даних перевірялася за критерієм Пірсона, а згладженість за параметром ексцесу. Коефіцієнт кореляції Пірсона для фази становить: при 1000 хв$^{-1}$ –0.999; при 750 – 0.997. Для відносної амплітуди відповідно 0.978, 0.974. Параметри ексцесу мають значення для фази: при 1000 хв$^{-1}$ – -0.435, при 750 – 0.434; для амплітуди відповідно –1.58 та –1.37.

Теоретичний аналіз показав, що при роботі дизельного двигуна з підвищенням зазору пропорційно зростає фаза виникнення віброакустичного посилання по відношенню до опорної точки. При цьому зростає також і енергія вібрації імпульсів від перекладки поршня.

Теоретичне дослідження швидкісних режимів роботи енергетичних установок показало, що найбільш оптимальним режимом діагностування є мінімально стійкі оберти двигуна (750 хв$^{-1}$), однак враховуючи те, що не кожен двигун в змозі утримувати даний режим, маючи граничне зношення ЦПГ, ми рекомендуємо для діагностування використовувати режим 1000 хв$^{-1}$.

Результати експериментальних досліджень показали, що при переході від окремого двигуна до множини збільшується розсіювання (величина основної помилки) в порівнянні з лабораторними дослідженнями (додаток К). Менший приріст спостерігався у фазового параметра. Більша зміна відносної амплітуди проходить на режимі 1000 хв$^{-1}$ обертання колінчастого валу, що пояснюється підвищенням швидкості в момент удару, за рахунок зростання сили газів в циліндрі і, як наслідок, більшою енергією удару. Більша ж зміна фазового параметра відбувається на мінімально стійких обертах колінчастого валу дизельного двигуна (рис.4.1).

За кращий діагностичний параметр слід вважати фазу віброакустичного посилання викликаного перекладкою поршня в зазорі (табл.4.2). При цьому оптимальним швидкісним є режим 1000 хв$^{-1}$.

4.2. Спектральний аналіз віброімпульсів викликаних циліндро-поршневою групою дизельних установок

4.2.1 Теоретичний спектр віброакустичних ударів ЦПГ

Одним із важливих питань у віброакустичній діагностиці є питання вибору інформативної смуги спектру сигналу і її нормування. Оптимальним є діапазон, в якому найменшій зміні структурного параметру відповідає зміна діагностичного. При цьому не обов’язково, щоб цей діапазон був розміщений в зоні максимуму енергії сигналу.

Вібраційний сигнал, що сприймається вібродатчиком, являє собою модульований за амплітудою полігармонійний сигнал. Його амплітуда пропорційна амплітуді ударного імпульсу на вході акустичного каналу. Кожна гармонічна складова має частоту модуляції, яка визначається шириною відповідної смуги прозорості фільтра, і частоту несучої, яка рівна середній частоті тієї ж смуги прозорості.

Для визначення пропускної здатності віброакустичного каналу циліндро-поршневої групи по частоті в звуковому діапазоні були досліджені амплітудно-частотні характеристики енергетичних установок Аллілуєвим В.А., Ждановським М.С., Миколаєнком О.В. [3.29].

Проведеними дослідженнями, встановлено, що власні коливання віброакустичного каналу найбільш сильно проявляються в діапазоні від 2 до 10 кГц. Однак звернувшись до діаграми можливих ударів енергетичної установки (рис.3.6) можна помітити, що на ударний імпульс 3-го циліндра, викликаний перекладкою поршня накладається сигнал закриття випускного клапана 4-го циліндра і навпаки. Аналогічні перешкоди присутні і для інших циліндрів. Очевидно, що сумарна перешкода при збігу моментів співударяння може бути значною, а відношення сигналу до перешкоди надто малим. У зв’язку з останнім можна зробити висновок про неможливість забезпечення достатньої роздільної спроможності, не дивлячись на значну енергію вібраційних коливань в активній зоні.

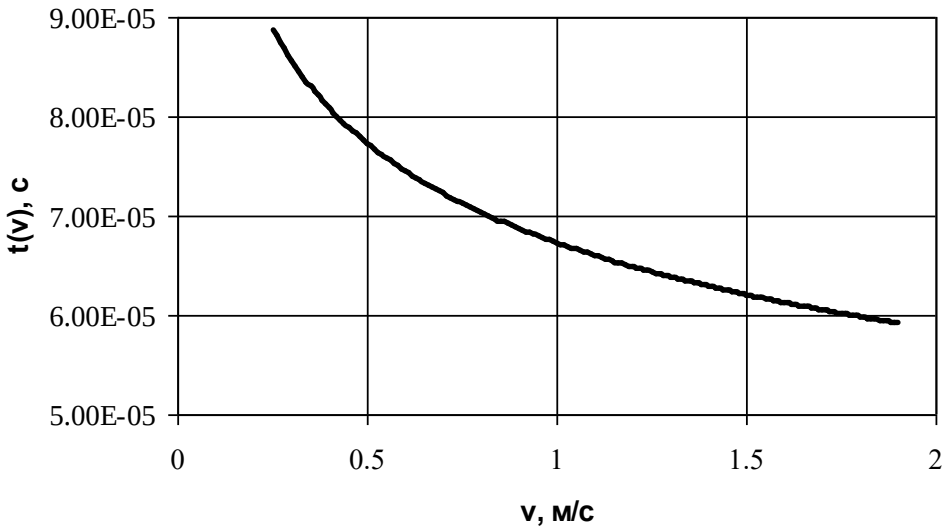
На низьких частотах в активній полосі при великій добротності резонансних систем каналу надто великий час встановлення коливання, що не дозволяє виділяти в чистому вигляді і розділять імпульси. Співудари в двигуні малі за тривалістю, чим обумовлюється широкий спектр (до 150 кГц) вібраційного відгуку. При збільшенні зазорів, за даними досліджень Соловьєва В.І. (діагностування в області резонансу), зменшується тривалість співударянь, що підвищує інтенсивність високочастотних складових спектру. Це підвищує діапазон вимірювань амплітуд вихідного сигналу в ультразвуковій частині спектру і підвищує роздільну спроможність [97, 98, 99].

Розглянуті вище положення дозволяють зробити висновок, що вирішення завдання вибору частотного діапазону можливе в області вищих частот, які не пов'язані з виявленою активною смугою віброканалу. При цьому доцільно використовувати ультразвуковий діапазон частот за межами області резонансу, де спектр є відносно суцільним. Доводом цієї точки зору є той факт, що відсутнє всяке спотворення, яке властиве структурному резонансу, що дає можливість отримати правдиве уявлення про сили і їх модуляцію. Отже, всі типи несправностей можуть бути представлені в кількісній формі індикаторами як "глибина модуляції" (різниця між рівнем гармонічних коливань і ступенем розповсюдження шуму) і коефіцієнтом гармонік в амплітудному спектрі. Для підтвердження існування співударів в зарезонансній зоні ультразвукового діапазону були проведені теоретичні розрахунки ширини спектру через тривалість співударянь.

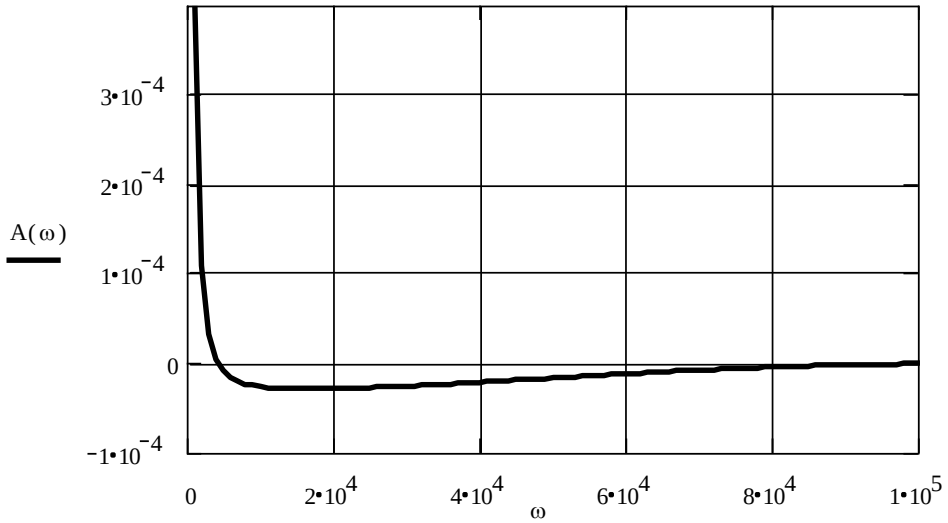
Теоретичні положення прийняті нами при вирішенні питання вибору інформативної смуги спектру були розглянуті в розділі 2.2. Для розрахунку ширини спектру визначали тривалість співударяння деталей ЦПГ, виходячи із швидкості в момент удару. Дані розрахунку наведені на рис.4.7.

Враховуючи, що діагностування проходить на частоті 1000 хв$^{-1}$, цьому відповідає швидкість від 0,37 до 0,67 м/с, що рівнозначне тривалості співударяння від $8.25 \cdot 10^{-5}$ до $7.25 \cdot 10^{-5}$ нами був розрахований теоретичний амплітудний спектр $AG(\omega)$ – (*а*), спектр потужності процесу $AG1(\omega)$ – (*б*) та логарифмічний $G(\omega)$ – (*в*) за залежностями 2.94 та 2.95 зображений на рис.4.8.

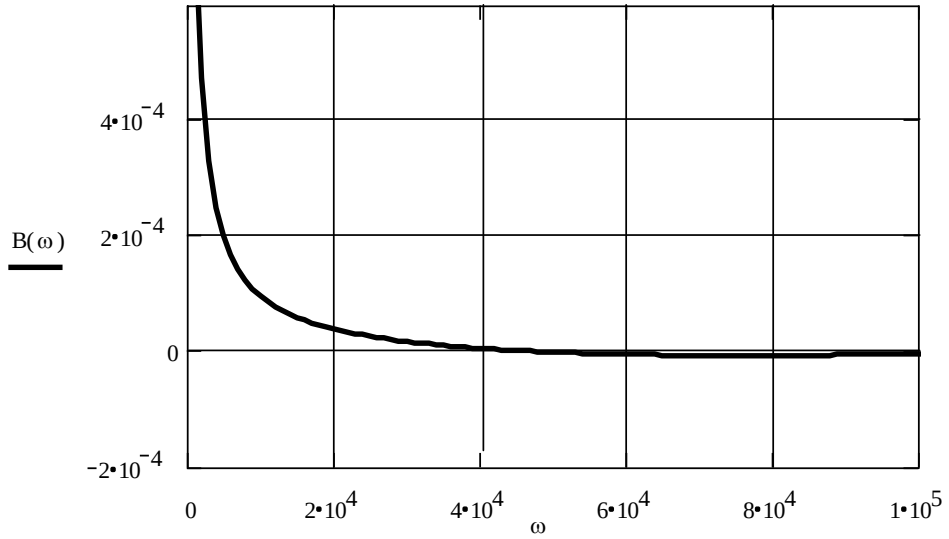
Рис.4.8 показує, що при деякому значенні частоти ω ($1.5 \cdot 10^5$ Гц) спектр імпульсу наближається до нуля. Вважатимемо таку частоту за верхню



а)



б)



в)

Рис.4.7. Графічні залежності:

а - тривалості співудару t(v) від швидкості в момент удару v;

б - дійсна частина спектру;

в - уявна частина спектру.

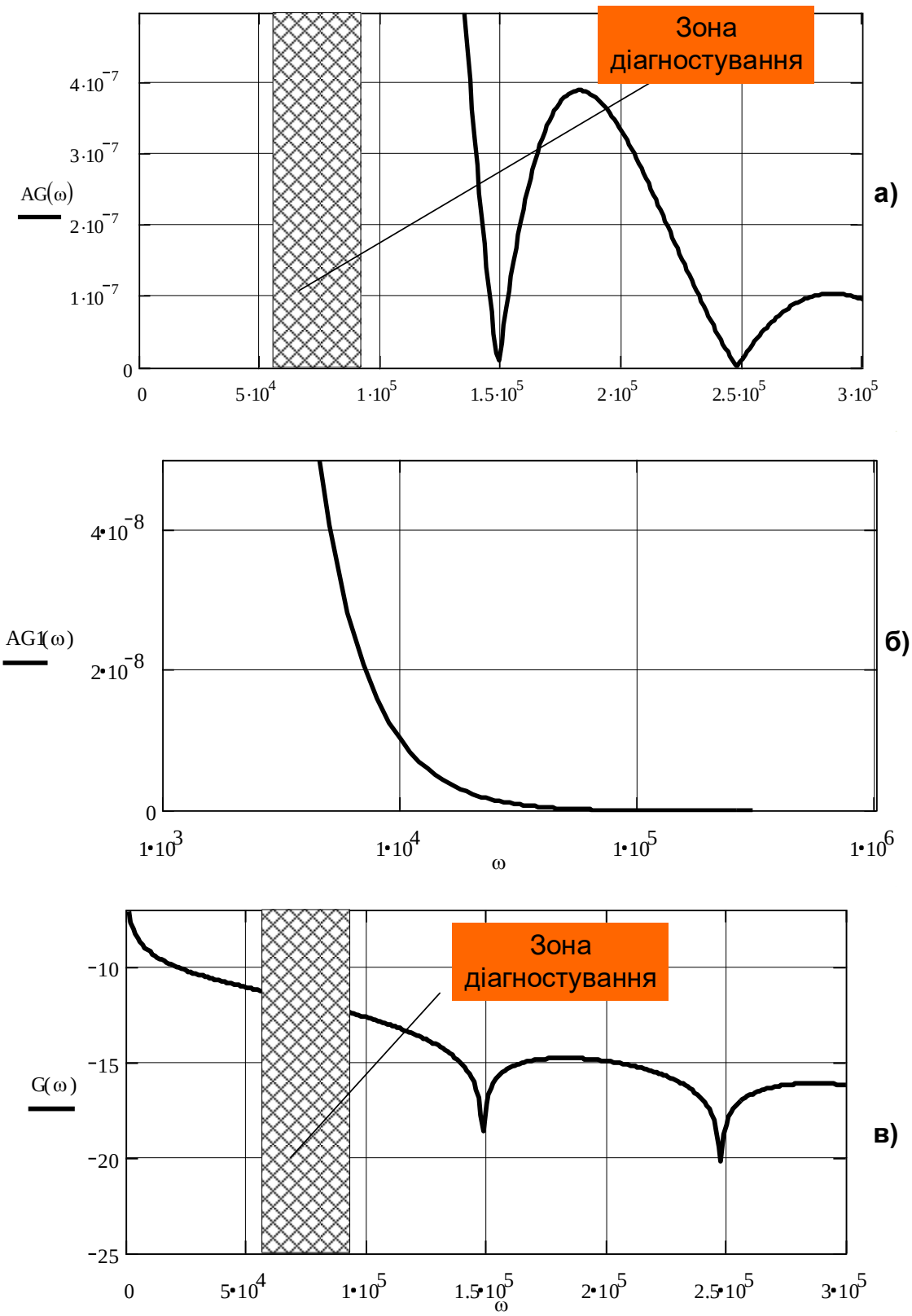


Рис.4.8. Графічні залежності теоритичних спектрів

а - амплітудного;

б - потужності процесу;

в - логарифмічного.

границю спектру $\omega_в$. При частоті вищій від останньої рівень амплітуди спектру підвищується, а потім знову наближається до нуля, причому ця картина повторюється. Характер форми розрахованих теоретичних спектрів повністю співпадає з теорією викладеною в розділі 2.2 та літературі [85, 87].

Діагностування на межі верхньої границі спектру в зарезонансній області ультразвукового діапазону за межами резонансу, де спектр є відносно суцільним, дозволив підвищити відношення “сигнал–перешкода”, при цьому в разі переходу до іншої марки двигуна можна уникнути спектрального аналізу цих посилань, а це в якійсь мірі свідчить про універсальність даного методу.

4.2.2. Експериментальний спектр сигналу перекладки поршня

Враховуючи положення викладені вище, стосовно ширини спектру сигналу перекладки поршня, були проведені експериментальні дослідження віброакустичного посилання з’єднання “поршень-гільза” на предмет його спектрального аналізу.

Спектр визначався як різниця спектральної щільності сигналу, який включає в себе перешкоду і спектральної щільності усередненої перешкоди справа і зліва від сигналу.

Кожен досліджуваний сигнал приводився до одного коефіцієнту підсилення, шляхом добутку величини сигналу на приводний коефіцієнт $K_{пр}$, який визначався за залежністю:

$$K_{пр} = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{256}{\triangleright k} \right)^2, \qquad (4.13)$$

де $\triangleright k$ – коефіцієнт підсилення який приймався при записуванні сигналу (розділ 3.2.2);

Дану операцію проводили з метою можливості подальших математичних дій з даним сигналом (сумування, віднімання множення і т. і.).

Використовуючи алгоритм швидкого перетворення Фурьє (3.4), отримували спектри потужності процесу за 64 точками по 5-ти реалізаціях для

кожного циліндра $AG(\omega)_{i,j}$ (i–номер циліндра. j–номер реалізації). Шляхом усереднення спектрів, було отримано усереднений спектр потужності процесу “сигнал + перешкода” за всіма циліндрами. Аналогічним чином визначався усереднений спектр потужності справа і зліва від корисного сигналу – спектр перешкоди. Різниця цих спектрів є спектром чистого сигналу позбавленого перешкоди (рис.4.9). Для логарифмування отриманого спектру користувалися залежністю закладеною в пакеті обробітку сигналів ПОС:

$$U_{lg} = k1 \cdot log_{10}\left(\frac{U}{U_{ref}}\right), \qquad (4.14)$$

де U_{lg} –значення логарифму вхідного масиву (спектру);

$k1$ – коефіцієнт, який залежить від характеристики вхідного масиву (для спектру потужності він рівний 10);

U – вхідний масив;

U_{ref} – максимальне значення масиву U.

Отриманий за залежністю (4.14) логарифмічний спектр показаний на рис.4.10.

Аналізуючи отримані спектрограми можна відмітити наявність 7-ми яскраво виражених максимумів сигналу. А саме на частотах – 3.5, 7.0, 14.75, 29.5, 41.3, 47.2 та 70.8 кГц. Враховуючи, що попередніми дослідниками в звуковому діапазоні точних результатів не було досягнуто, був вибраний зарезонансний ультразвуковий діапазон. Зона резонансу віброперетворювача B&K Type 4333 становить близько 40 кГц.

Для позбавлення низькочастотних складових спектру та резонансу, сигнал фільтрувався фільтром високої частоти ФВЧ з частотою зрізу

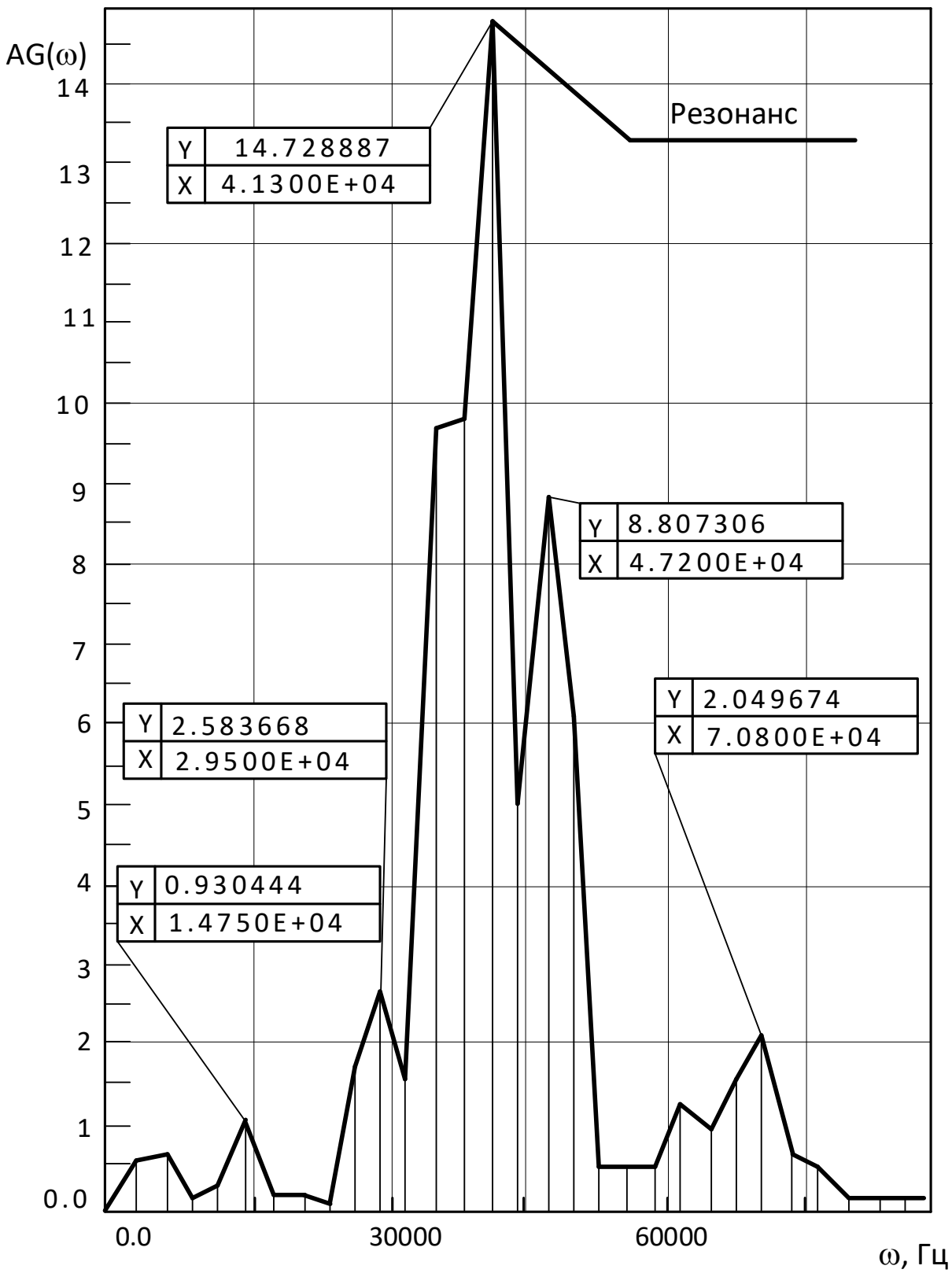


Рис.4.9. Усереднений по 5 реалізаціях (24 сигнали) спектр потужності сигналу перекладки поршня.

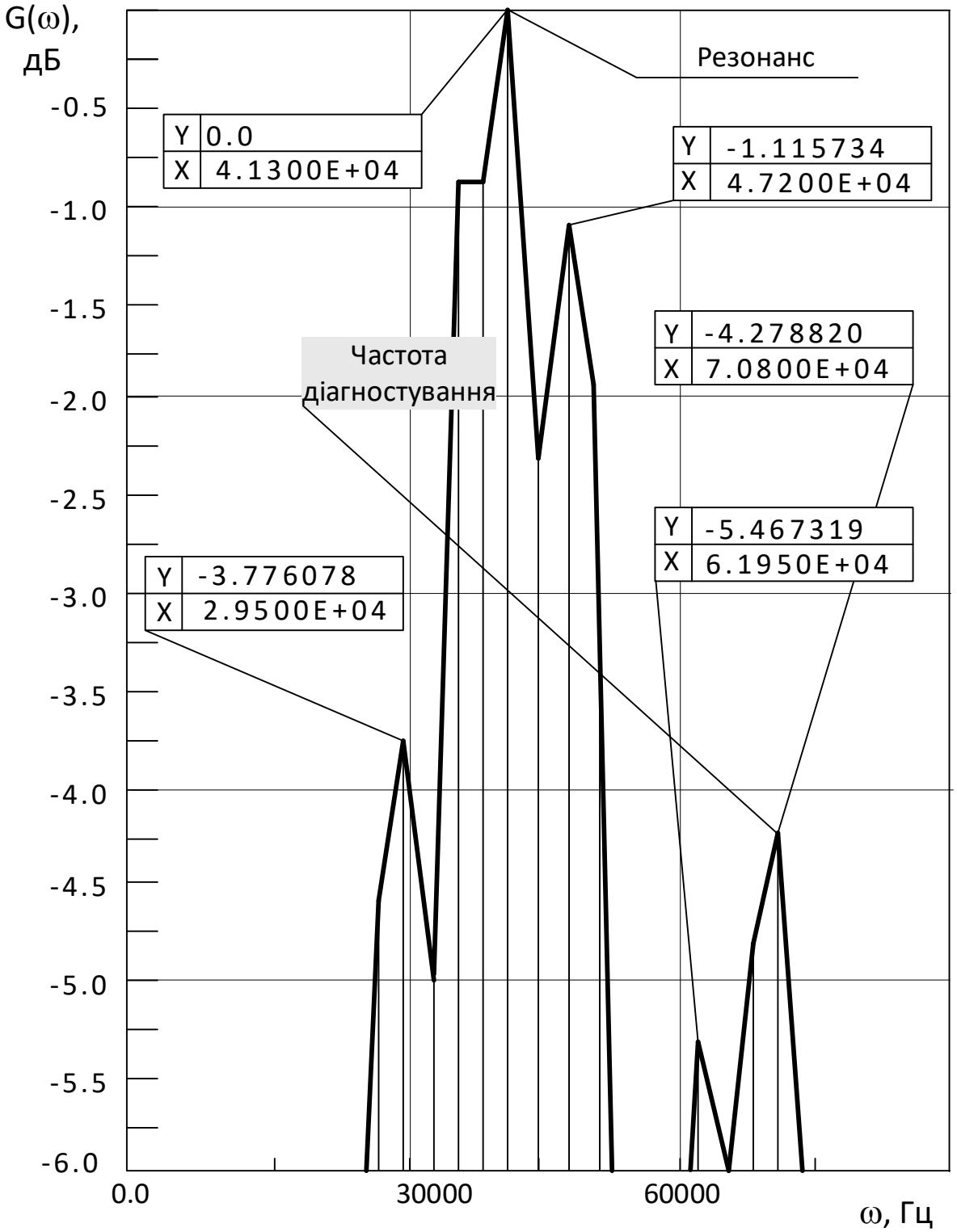


Рис.4.10. Усереднений по 5 реалізаціях (24 сигнали) логарифмічний спектр сигналу перекладки поршня.

відповідно – 45 кГц. Частота затухання на подвійній частоті зрізу цифрового фільтру Чебишева 7–го порядку становила близько 65 дБ.

Проведений теоретичний і експериментальний спектральний аналіз доказав можливість діагностування з'єднання "поршень-гільза" в зарезонансній зоні ультразвукового діапазону на частоті близько 70 кГц. Використання даного діапазону дозволило підвищити відношення "сигнал–перешкода". Результатами експериментальних досліджень спектральної щільності сигналу перекладки поршня встановлено, що із зміною частоти обертання колінчастого валу дизельного двигуна, частотний діапазон пружних коливань змінюється несуттєво (на 800-1200 Гц). Із збільшенням же зазору в ЦПГ зміна частотного діапазону не спостерігалася.

4.3. Залежність роботоздатності дизельного двигуна СМД-31А від параметрів фази і амплітуди віброудару

Точність і правильність постановки діагнозу в умовах інтенсивного, нерівномірного зношення ЦПГ дизельного двигуна залежить значною мірою від знання закономірностей розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак W0 та W1. Порядок визначення цих закономірностей був розглянутий в розділі 2.3.

Як зазначалося вище за найбільш інформаційні параметри були прийняті фаза виникнення віброакустичного посилання і відносна амплітуда. При цьому створювалися навчальні та екзаменаційні послідовності окремо для справного і несправного з'єднань фази та відносної амплітуди. Дані послідовності визначалися для 750 і 1000 хв$^{-1}$.

Константами роботи програми, які коригувалися в процесі розрахунків були прийняті дані таблиці 4.3.

Подальший обробіток здійснювався за допомогою розробленої програми (додаток Е). Результатом роботи програми було створення гістограм розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак по навчальній вибірці. Наведені закономірності розподілу щільності вірогідності та відповідних

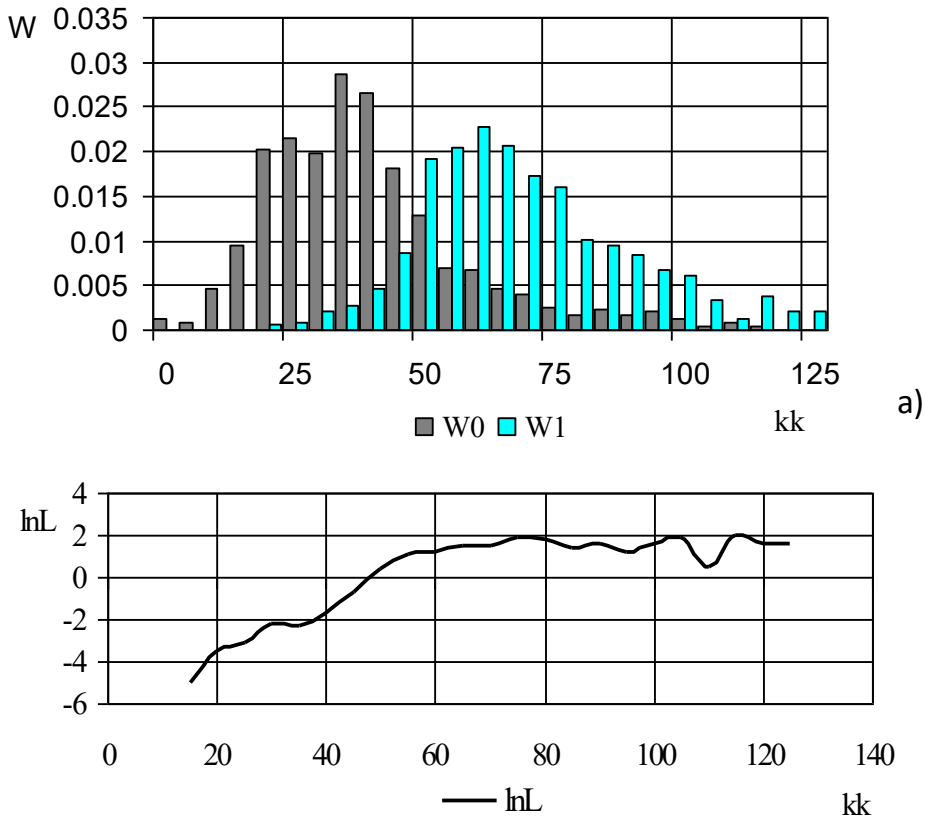
логарифмів відношення правдоподібності (додатки Л, М) приведені на рис.4.11 для 1000 і на 4.12 для 750 хв$^{-1}$.

Таблиця 4.3

Вхідні константи програми визначення технічного стану двигуна.

Константи	Значення констант при частотах колінчастого валу			
	750		1000	
	фаза	амплітуда	фаза	амплітуда
C0	0.0653	0.0067	0.099	0.0055
C1	15	150	10	180
LnC0	-2.728	-5.0	-2.305	-5.195
LnC1	2.728	5.0	2.305	5.195
LnC	0	0	0	0
Розм. комірки	2.5	5	2.5	5
Мах кільк. рішень	10	2	10	2
Кільк. елементів для навчання	30	40	30	40

Аналіз приведених закономірностей показує, що характеристика розподілу фази в обох випадках є одномодальною, тоді як амплітуда, за виключенням несправного з'єднання для 750 хв$^{-1}$, має двомодальний характер ("двогорбий"). Як видно з графіків області справного D_0 і несправного D_1 станів перетинаються. Величина зони невизначеності значно більша у амплітудного параметру і становить для 1000 –18 комірок (величина комірки 5), а для 750 – 17. Зона невизначеності для фазового параметру однакова для різних частот обертання і становить 5 комірок (величина комірки 2.5) з тією лише різницею що для 750 хв$^{-1}$ перекриття наступає пізніше на 1 комірку. Однак, порівнюючи величини щільностей вірогідності векторів фази в зоні перекриття, можна відмітити значну різницю між векторами справного і несправного станів, що свідчить про добру роздільність цих станів.



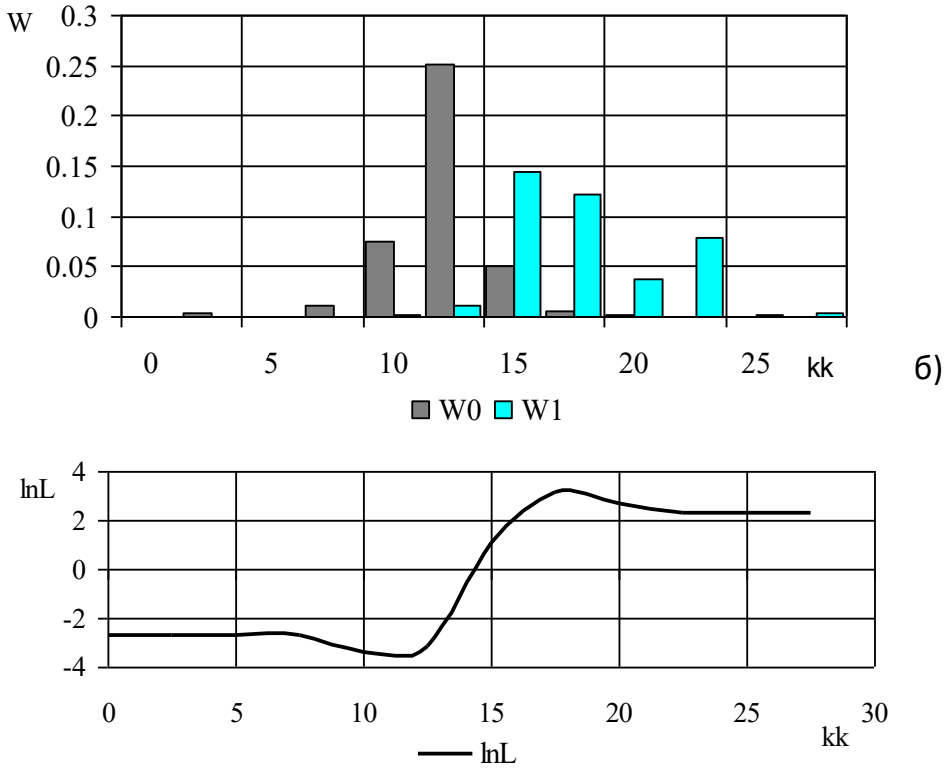


Рис.4.11. Гістограми розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак та логарифмів відношення правдоподібності при 750 хв$^{-1}$ для: *а* - відносної амплітуди, *б* - фази.

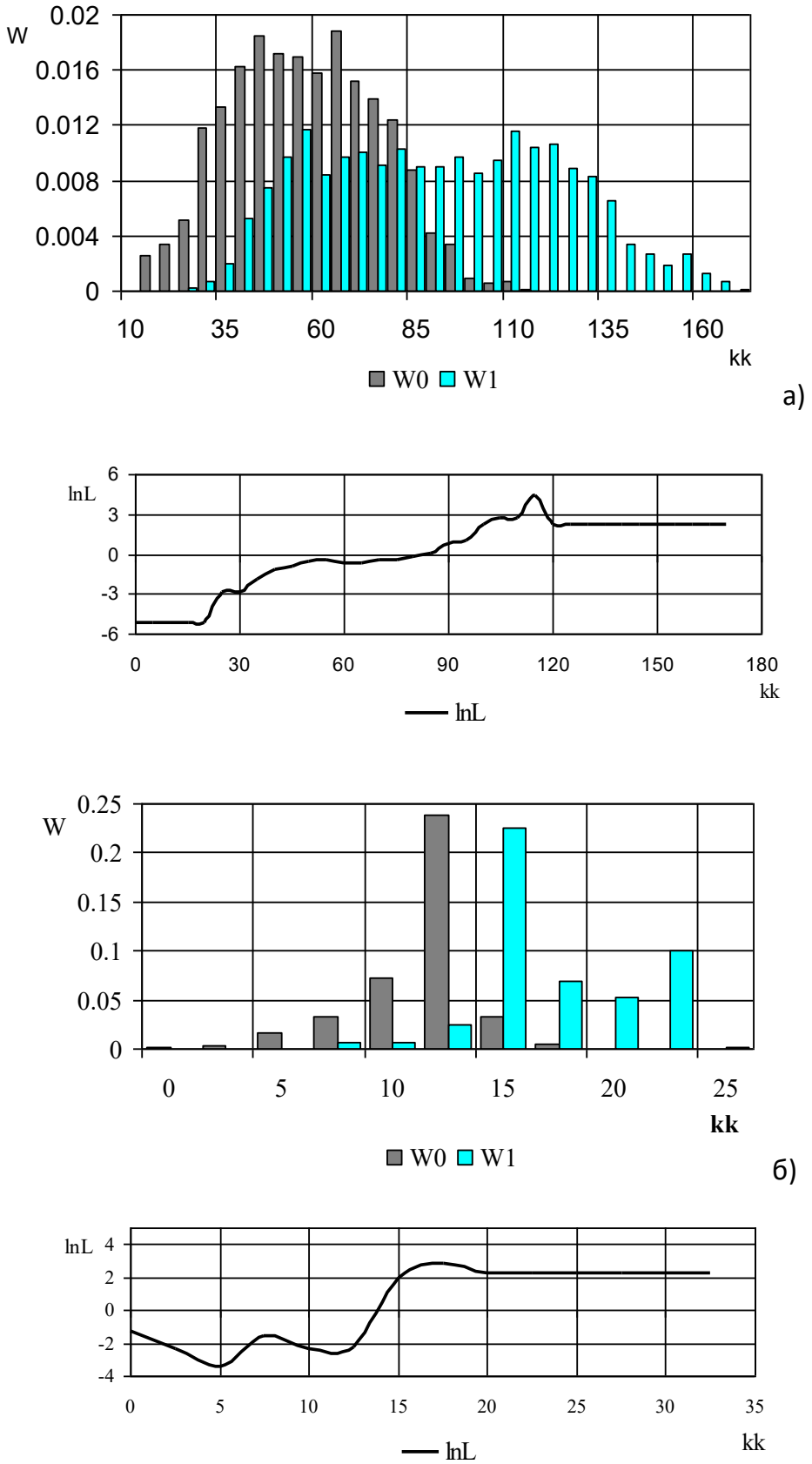


Рис.4.12. Гістограми розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак та логарифмів відношення правдоподібності при 1000 хв$^{-1}$ для: а - відносної амплітуди, б - фази.

Визначення технічного стану, в якому перебуває об’єкт діагнозу, згідно методики викладеної в підрозділі 3.9, передбачає визначення помилок першого α (хибної тривоги) і другого β (пропуск дефекту) роду. Оптимізація результатів розрахунку зводилася до зміни констант роботи програми, приведених в таблиці 4.3, з метою отримання мінімуму помилок першого і другого роду. Результатом є дані приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Значення помилок першого і другого роду для діагностичних ознак фази ті відносної амплітуди для 1000 і750 хв$^{-1}$.

Діагностична ознака	Частота обертання, хв$^{-1}$	Параметри помилок 1–роду			Параметри помилок 2–роду		
		Кількість помилок	Σ кількість рішень	α	Кількість помилок	Σ кількість рішень	β
Фаза	1000	2	257	0.00778	7	349	0.02
	750	4	274	0,015	3	149	0,02
Відносна амплітуда	1000	28	565	0.05	35	460	0.076
	750	24	206	0,117	10	175	0,057

Проведений аналіз таблиці 4.4 показав, що краще розпізнавання стану з’єднання “поршень-гільза” системи ЦПГ дизельного двигуна СМД-31А можливе для діагностичної ознаки – фази виникнення віброакустичного імпульсу викликаного перекладкою поршня при 1000 хв$^{-1}$.

При цьому значення хибної тривоги не перевищить 7 випадків на 1000 об’єктів діагностування, а значення пропуску дефекту 20 випадки на 1000. Ці дані певною мірою можуть характеризувати точність постановки діагнозу про дійсний стан ЦПГ.

4.4. Результати діагностування дизельного двигуна СМД-31А

У відповідністю з методикою експериментальних досліджень були отримані значення фази виникнення віброударних відгуків дизельного двигуна СМД-31А, викликаних перекладкою поршня, визначених за допомогою розробленого діагностичного приладу. Двигун мав наробіток близько 600 мото. год.

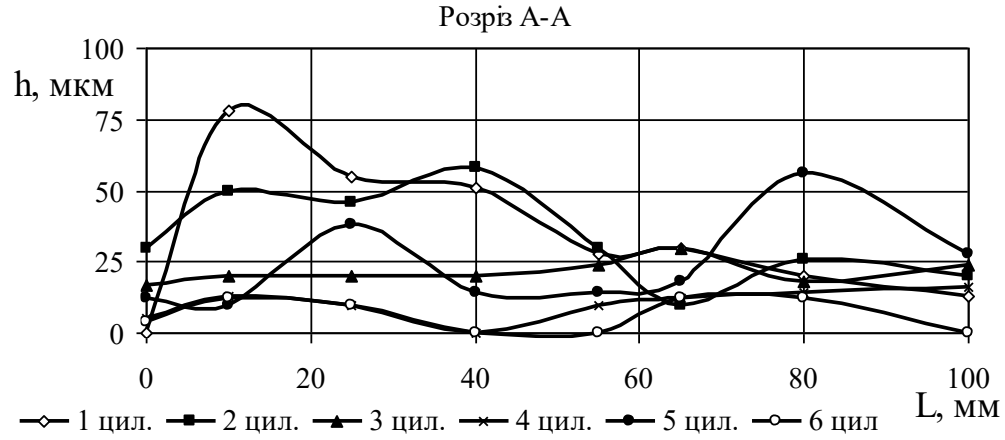
Дані мікрометражу представлені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

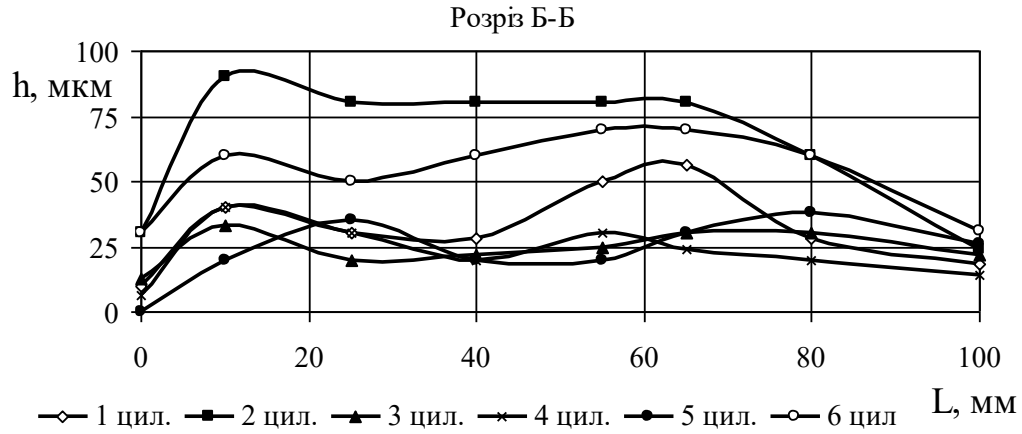
Усереднені результати мікрометражу деталей двигуна СМД-31А.

Найменування величин і їх розмір	Номер циліндра					
	1	2	3	4	5	6
1. Зношення гільз циліндра, мм	0.18	0.24	0.22	0.14	0.26	0.31
2. Зазор гільза – поршень по юбці, мм	0.48	0.52	0.46	0.47	0.50	0.52
3. Овал поршнів по юбці, мм	0.03	0.035	0.040	0.030	0.030	0.045
4. Зношення поршнів по юбці, мм	0.30	0.28	0.24	0.33	0.24	0.21
5. Зношення канавок поршнів по висоті, мм	0.12	0.12	0.15	0.14	0.14	0.12
6. Зазор кільце-канавка поршня по висоті, мм	0.20	0.19	0.19	0.17	0.18	0.20
7. Зазор в замку кілець у вільному стані, мм	15.8	15.5	16.2	16.0	15.4	16.3
8. Зазор в замку кілець в калібрі рівному номін. діам. гільзи, мм	0.51	0.49	0.53	0.52	0.49	0.55

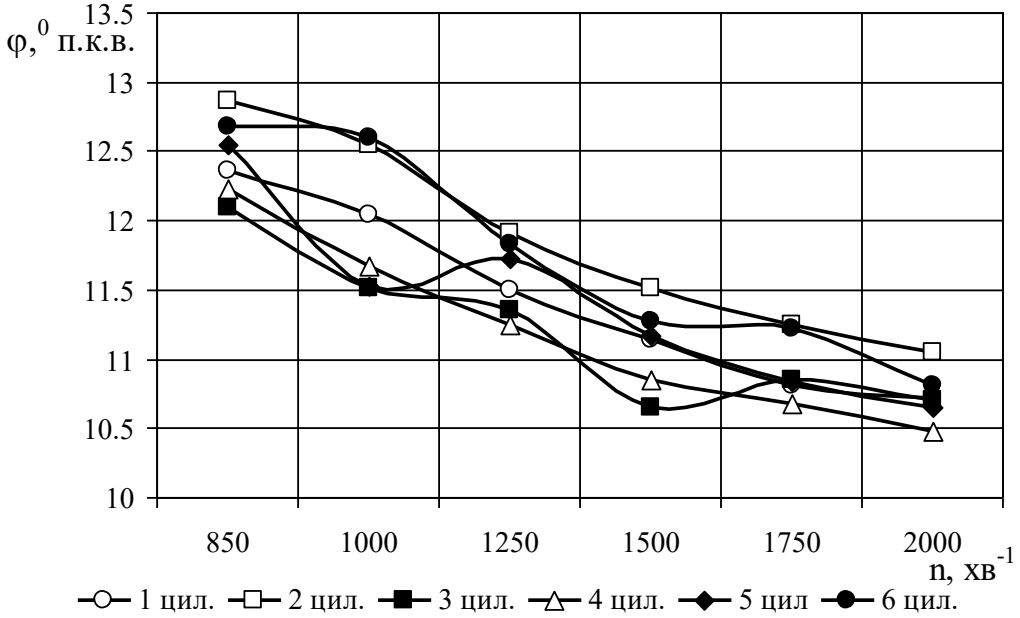
Аналізуючи дані зношення гільз циліндрів (рис. 4.13 а, б) можна відмітити нерівномірність зношення гільз циліндрів по висоті. Зношення гільзи циліндра напряму залежить від роботи системи мащення. Найбільше



а)



б)



в)

Рис.4.13. Результати мікрометражу гільз циліндрів (а, б) та усереднення експериментальних даних знятих переносним приладом (в).

зношення гільза має в верхній частині. Це пояснюється вигоранням оливи в районі першого компресійного кільця і як наслідок зміни режиму мащення.

Зазор в спряженні “поршень – гільза” має майже однакове зношення 0.46-0.52 мм.

Після мікрометражу проводили визначення фази віброударного відгуку викликаного перекладкою за допомогою розробленого приладу у відповідності з методикою.

У результаті лабораторних досліджень були отримані по 10 значень фази на кожній частоті обертання колінчастого валу для кожного циліндра. Їх усереднені значення наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Усереднені значення фази та коефіцієнтів кореляції Пірсона

Частота обертання колінчатого валу, $хв^{-1}$	Номер циліндра						Кореля-ція Пірсона
	1	2	3	4	5	6	
	Значення зазору за номером циліндра						
	0.48	0.52	0.46	0.47	0.5	0.52	
850	12.36	12.87	12.09	12.23	12.54	12.68	0.976
1000	11.91	12.55	11.51	11.67	11.98	12.60	0.974
1250	11.50	11.91	11.35	11.25	11.72	11.83	0.964
1500	11.14	11.52	10.65	10.84	11.16	11.27	0.921
1750	10.81	11.24	10.85	10.68	10.84	11.23	0.857
2000	10.71	11.04	10.70	10.48	10.65	10.80	0.702
Ексцес	-1.15	-1.60	-0.52	-0.63	-1.26	-1.91	

Мінімальна частота обертання була прийнята рівною 850 $хв^{-1}$, так як з меншою двигун був не в змозі працювати.

За даними отриманими в результаті статистичного обробітку вхідних даних, були побудовані залежності фази виникнення віброакустичних посилань від частоти обертання колінчастого валу для кожного циліндра. Ці залежності

представлені на рис. 4.13, в. Характер кривих в більшості випадків може бути виражений прямою лінією.

Визначені коефіцієнти кореляції Пірсона (табл.4.6) вказують на існування досить щільного зв'язку між фазою і зазором в ЦПГ. Найкращі значення зазначеного коефіцієнту отримані для менших частот обертання колінчастого валу. Гірші для більш високих.

Від'ємні параметри ексцесу вказують на згладженість отриманих кривих.

Аналіз отриманих даних вказує на можливість використання розробленого діагностичного приладу для діагностування ЦПГ дизельних енергетичних установок.

4.5. Прогнозування залишкового ресурсу дизельних енергетичних установок

Як правило, технічний стан вузла чи агрегату та необхідність відправлення їх в капітальний ремонт визначають за зношенням основних його спряжень. Якщо зношення основних спряжень досягло граничної величини, то вважають, що і агрегат вичерпав свій ресурс. Для двигуна одним із таких спряжень є "поршень-гільза". Таким чином прогнозування залишкового ресурсу двигуна зводиться до прогнозування залишкового ресурсу ЦПГ.

Найбільш точним серед методів прогнозування є прогноз по реалізації, тобто зміні параметра технічного стану конкретної машини в залежності від наробітку. При прогнозуванні за індивідуальною реалізацією простіше і точніше враховуються конкретні якості машини, умови експлуатації, однак використання цього методу залежить від наявності відомостей про наробіток кожного двигуна, а це не завжди можливо. Виходом з даного положення є введення поправочного коефіцієнта, який показує відмінність (різницю) індивідуальних параметрів роботи конкретного двигуна від середньостатистичних. Таким поправочним коефіцієнтом був прийнятий коефіцієнт інтенсивності зношення *kz*.

В результаті виробничих випробовувань розробленого приладу для віброакустичного діагностування ЦПГ був отриманий статистичний ряд

наробітку дизельних енергетичних установок на межі зношення. Даний статистичний ряд приведений в таблиці 4.7.

Дані табл. 4.7 отримані шляхом вимірювання фази віброакустичного посилання, викликаного перекладкою поршня, відфільтрованого сигналу в ультразвуковому діапазоні на частоті 70 кГц.

Таблиця 4.7

Статистичний ряд наробітку дизельної енергетичної установки на межі зношення ЦПГ.

Наробіток двигунів при граничному зазорі 0.64 мм							
№ дв.	Нароб.	№ дв.	Нароб.	№ дв.	Нароб.	№ дв.	Нароб.
1	980	14	1050	27	1130	40	1040
2	990	15	1030	28	1200	41	1100
3	980	16	1110	29	1220	42	1209
4	1190	17	680	30	826	43	1390
5	920	18	1039	31	1240	44	1178
6	1240	19	990	32	1080	45	890
7	1100	20	1160	33	1299	46	1000
8	1130	21	1150	34	1120	47	1115
9	1080	22	1070	35	980	48	1040
10	1090	23	1120	36	1190	49	1040
11	1090	24	1140	37	1150	50	1020
12	1150	25	1080	38	1070	51	1120
13	1090	26	1070	39	1140	52	950

Наробіток визначався за мотолічильником. При цьому враховували, що показання мотолічильника приведені до частоти обертання 1800хв$^{-1}$, тоді як реальна частота обертання двигуна становить 2000 хв$^{-1}$, тому показання мотолічильника множили на коефіцієнт 0.9, як зазначено в інструкції по експлуатації. Фаза віброакустичного посилання становила від 14 до 14.2° п.к.в., що відповідає зазору в ЦПГ– 0.62-0.64 мм.

Наробіток двигуна, враховуючи нерівномірність зношення при різних умовах експлуатації, є випадковою величиною. Тому для визначення закону розподілу випадкової величини використовували математично-статистичний апарат.

Дані таблиці 4.7 зводилися в інтервальний статистичний ряд (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8

Інтервальний ряд наробітку дизельної установки

Інтервали, м-год	Частота, m_i	Статистична вірогідність	Частота, %
650 - 700	1	0.019	1.92
700 - 750	0	–	–
750 - 800	0	–	–
800 - 850	1	0.019	1.92
850 - 900	1	0.019	1.92
900 - 950	1	0.019	1.92
950 - 1000	6	0.115	11.5
1000 - 1050	7	0.1346	13.46
1050 - 1100	10	0.192	19.20
1100 - 1150	11	0.2115	21.15
1150 - 1200	7	0.1346	13.46
1200 - 1250	5	0.096	9.62
1250 - 1300	1	0.019	1.92
1300 - 1350	0	–	–
1350 - 1400	1	0.019	1.92
Всього	52	1.0	100.0

Число вибраних розрядів залежить від величини прийнятого інтервалу, який визначався за залежністю [91]:

$$\Delta t = \frac{R_{max} - R_{min}}{\left(1 + 3.3\, ln\, N_{\partial}\right)}, \qquad (4.15)$$

де Δt – величина інтервалу (Δt=50.57, приймаємо Δt=50);

$R_{max} - R_{min}$ – розмах показань (R_{max}=1390; R_{max}=680);

N_{∂} –число спостережень (N_{∂}=52).

Знаючи величину інтервалів, визначаємо їх кількість $K_{інт}$:

$$K_{інт} = \frac{R_{max} - R_{min}}{\Delta t}, \qquad (4.16)$$

Виходячи з розрахованих даних прийнято кількість інтервалів 15. Даний статистичний ряд у вигляді гістограми приведений на рис.4.14 а.

Для визначення параметрів статистичного ряду наробітку, зокрема середнього значення, середньоквадратичного відхилення, дисперсії, проводили додаткові розрахунки наведені в додатку Н.

Розрахунки проводили шляхом введення нової випадкової величини t_i'

$$t_i' = (t_i - t_0) / \Delta t, \qquad (4.17)$$

де t_i' – нова випадкова величина;

t_i – середнє значення інтервалу;

t_0 – середина середнього значення t_i;

Значення нової випадкової величини визначали виходячи з виразу:

$$t_i' = \frac{t_i - t_0}{\Delta t}, \qquad (4.18)$$

Середнє значення випадкової величини $\bar{t}_i$ та середньоквадратичне відхилення σ визначали за залежностями:

$$\bar{t}_i = t_0 + a_1 \cdot \Delta t, \qquad (4.19)$$

$$\sigma = \Delta t \cdot \sqrt{a_2 - a_1^2}, \qquad (4.20)$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти визначені за допомогою системи:

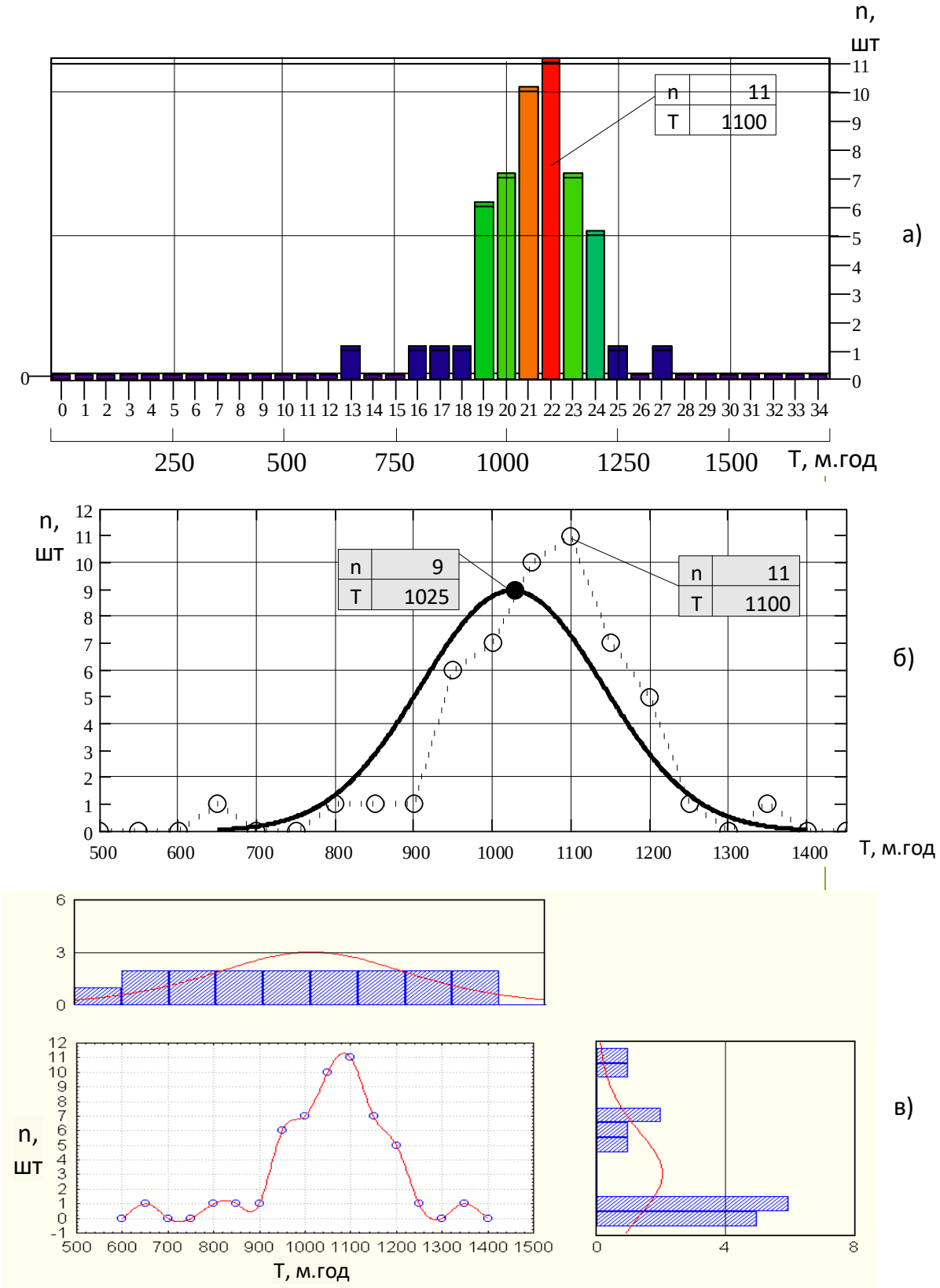


Рис.4.14. Гістограма (а) та закони розподілу (б, в) наробітку двигунів СМД-31А зернозбиральних комбайнів ДОН-1500 (ДОН-1500А) до першого капітального ремонту (кількість об'єктів - 52).

$$\begin{cases} a_1 = \dfrac{\sum m_i \cdot t_i'}{\sum m_i} \\ a_2 = \dfrac{\sum m_i \cdot \left(t_i'\right)^2}{\sum m_i} \end{cases}, \qquad (4.21)$$

В результаті обробітку статистичних даних були отримані наступні значення параметрів:

– середнє значення – 1025 м.-год;
– середньоквадратичне відхилення – 115.7486 м.-год;
– дисперсія – 13397.74;
– коефіцієнт варіації – 0.112925.

Отриманий коефіцієнт варіації вказує ,що отримані дані відповідають закону нормального розподілу. Після чого проводили вирівнювання емпіричного розподілу за законом нормального розподілу. Емпіричний та нормальний розподіл приведено на рис. 4.14 б.

Відповідність емпіричної кривої теоретичному закону розподілу перевіряли за критерієм згоди Колмогорова λ. Даний критерій становить 0,67, що відповідає вірогідності $P(\lambda)$= 0.79

Функціональна залежність фазового параметру виникнення віброударного посилання від наробітку дизельного двигуна $T = f(\varphi)$ встановлювалася шляхом визначення поліномінальної регресії векторів експериментальних даних отриманих за результатами лабораторних і виробничих випробовувань $\vec{vz}$–значення фази та $\vec{vy}$–значення наробітку (додаток Ж).

Рівняння регресії залежності наробітку від фази має вигляд:

$$fT(\varphi) = 15.97462 \cdot \varphi^3 - 573.3526 \cdot \varphi^2 + 6.93222 \cdot 10^3 \cdot \varphi - 2.75359 \cdot 10^4, \qquad (4.22)$$

При цьому, враховуючи визначену обернену лінійну залежність до (4.11) зазору від фази $h(\varphi) = -0.523 + 0.082 \cdot \varphi$ рівняння регресії залежності наробітку від зазору матиме вигляд:

$$fT(h) = -9.3592 \cdot 10^3 \cdot h^3 + 1.511 \cdot 10^4 \cdot h^2 - 5.097 \cdot 10^3 \cdot h + 555.314, \quad (4.23)$$

Графічні залежності рівнянь регресії приведено на рис.4.15., 4.16.

Загальне рівняння поверхні рис.4.17 *б* лінійної інтерполяції експериментальних даних залежності наробітку двигуна *T(h,φ)* – м.год. від фази віброударного посилання *φ* – °п.к.в. та зазору *h* – мм. в ЦПГ для дизельної установки має вигляд:

$$T(h,\varphi) = -586.243 + 3127.907 \cdot h - 26.74 \cdot \varphi \qquad (4.24)$$

Однак, якими би повними не були аналітичні вирази для визначення залишкового ресурсу, використання останніх пов'язано з великою кількістю розрахунків, що незручно в умовах рядової експлуатації.

Значно простіше визначати залишковий ресурс за допомогою номограми. Результати розрахунків кривих наробітку за рівнянням (4.22) з кроком σ, визначені за допомогою зазначених програм (додатки Ж, З), наведені в додатку П.

При цьому крок σ є постійно змінною величиною, в залежності від поточної точки кривої, яка визначалася як добуток поточного значення середнього наробітку на визначений коефіцієнт варіації.

```
SK := | Tsr ← Tsr
      | for j ∈ 0..6
      |   for i ∈ 0..rows(Tsr) − 1
      |     | σ_{i,j} ← Tsr_i · ν
      |     | SK_{i,j} ← Tsr_i + [3·σ_{i,j} − j·(σ)_{i,j}]
      | SK
```

Для практичного використання результатів розрахунку на рис.4.18 приведена номограма визначення зазору *h* в ЦПГ, залишкового ресурсу $T_{зал}$,

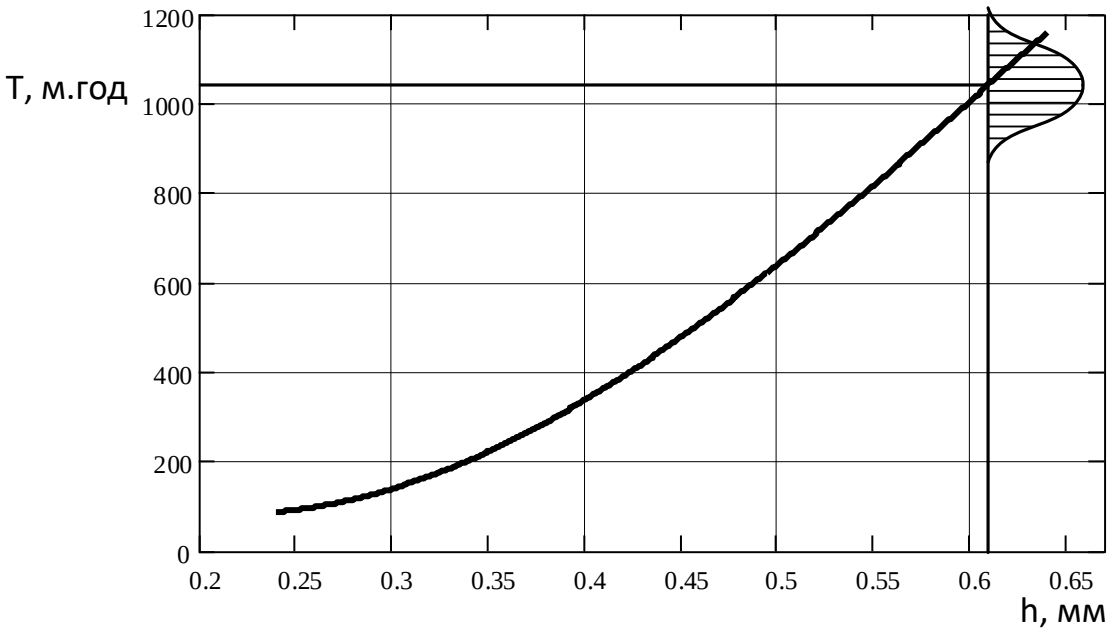


Рис.4.15. Залежність (для визначення залишкового ресурсу) наробітку двигуна T від зазору h в ЦПГ

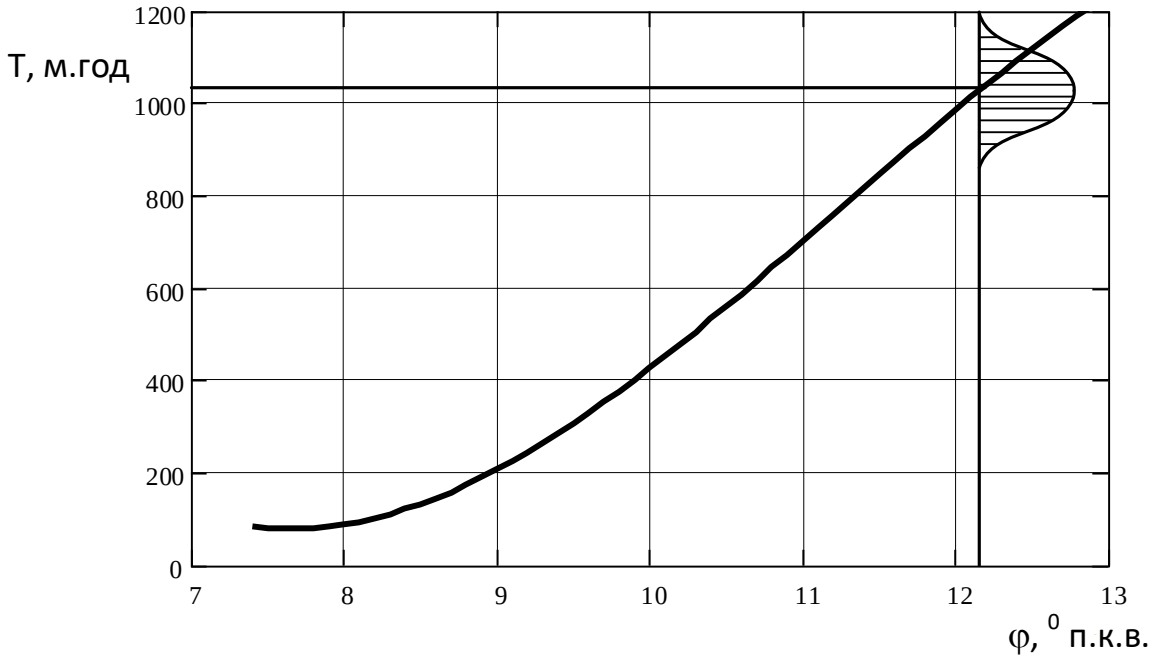
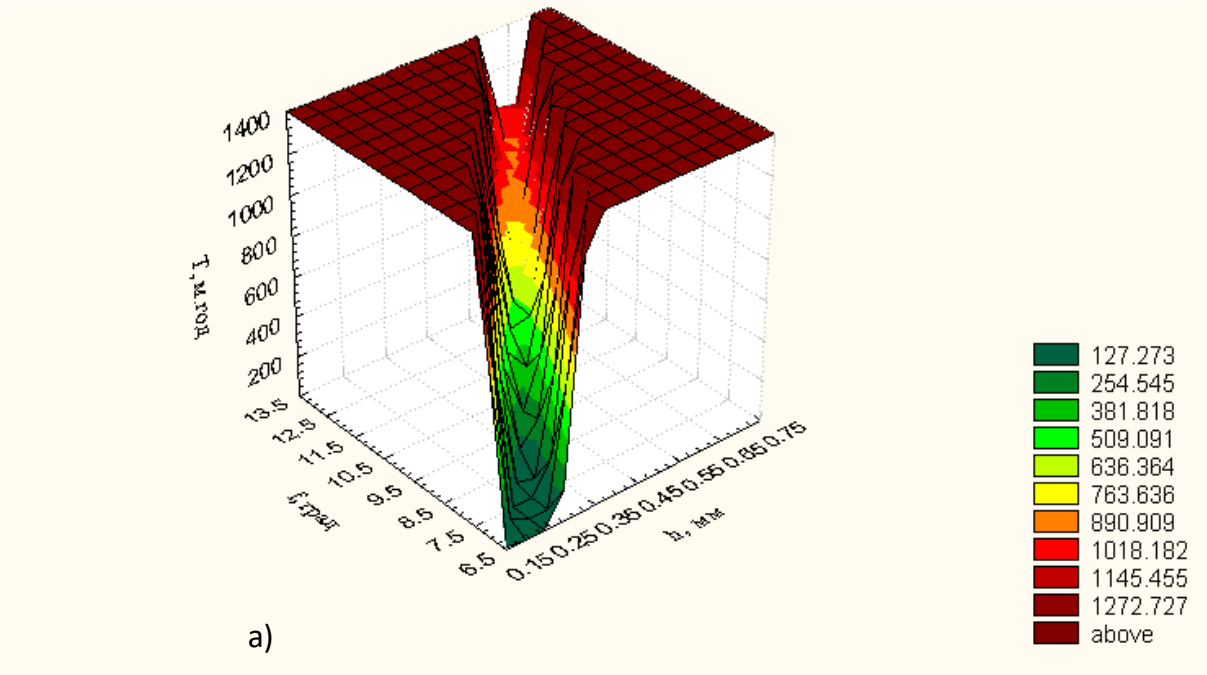


Рис.4.16. Залежність (для визначення залишкового ресурсу) наробітку двигуна T від фази удару φ в ЦПГ



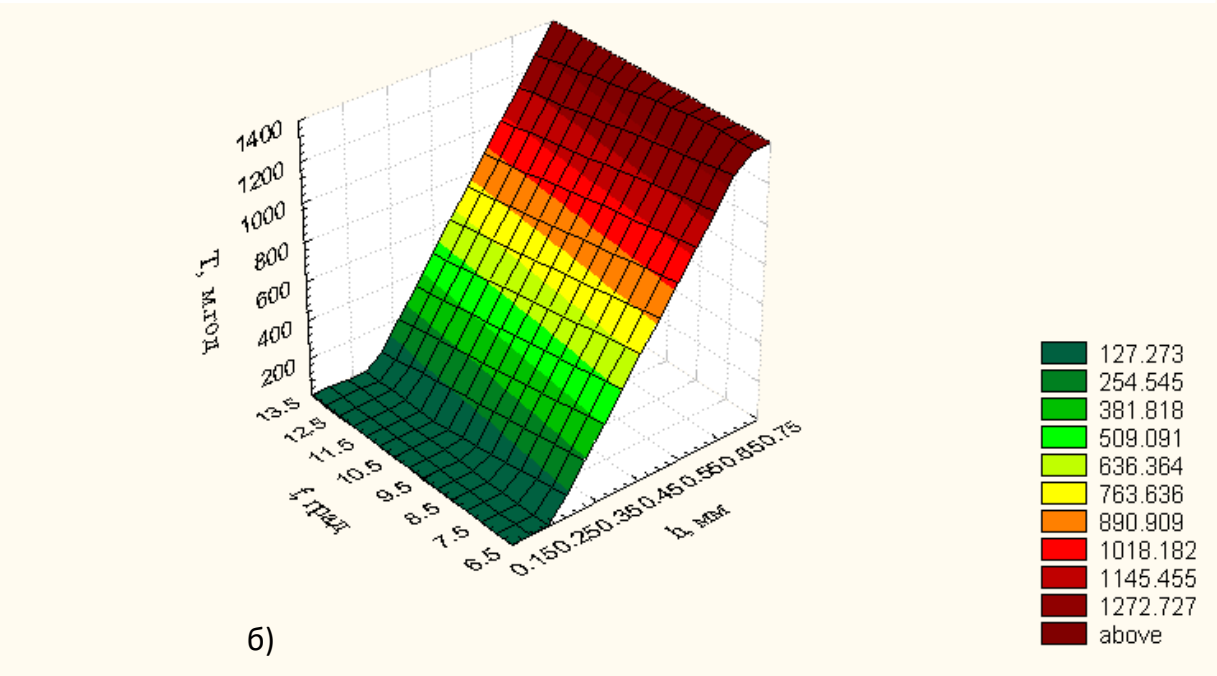


Рис.4.17. Поверхні розподілу експериментальних даних залежності наробітку двигуна Т від фази віброударного посилання f та зазору в ЦПГ для двигуна СМД -31А.
а - сплайн інтерполяція; б - лінійна інтерполяція.

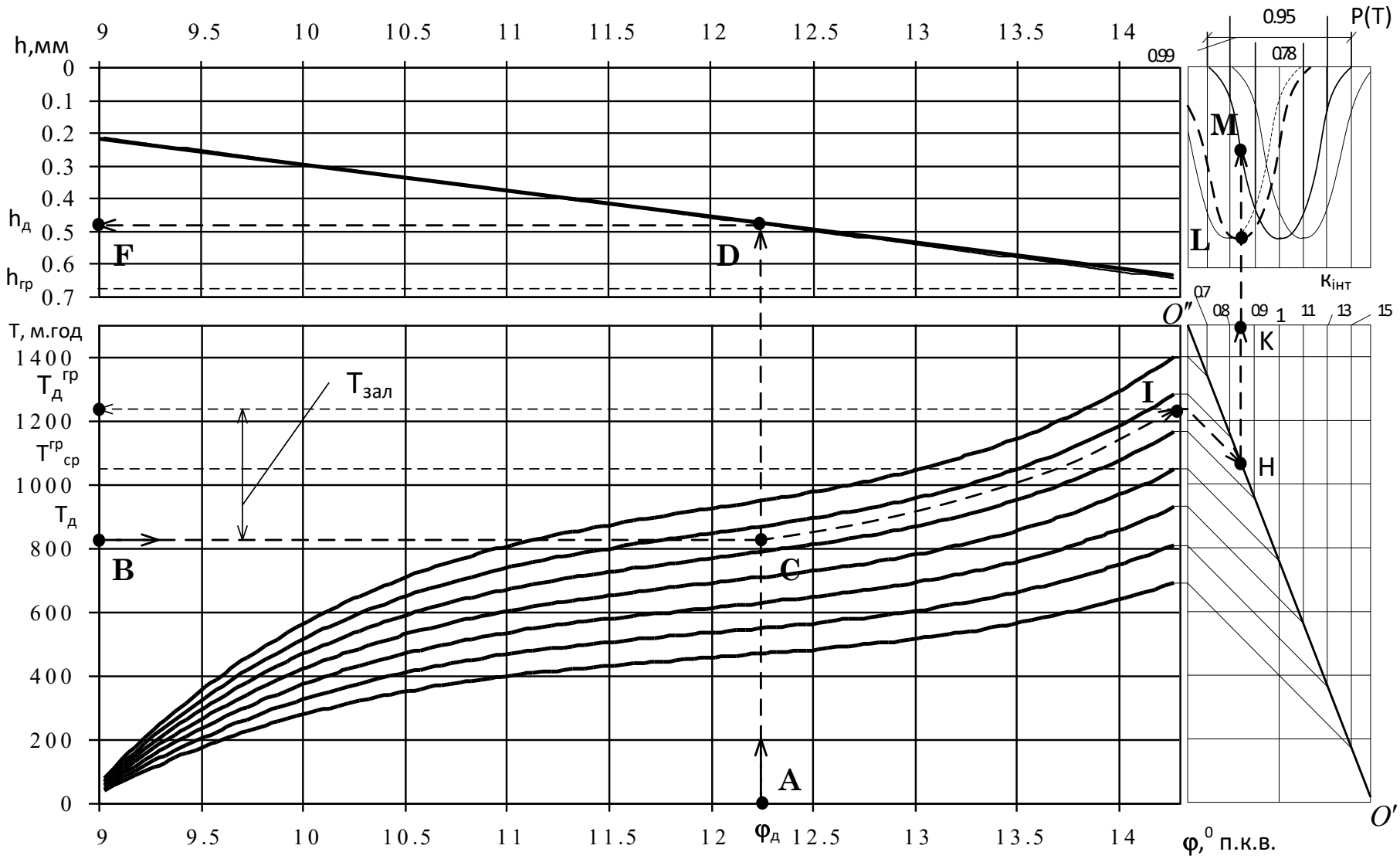


Рис.4.18. Номограма визначення зазору **h** в ЦПГ, залишкового ресурсу $\mathbf{T_{зал}}$, коефіцієнта інтенсивності зношування $\mathbf{к_{інт}}$ та вірогідності відхилень від закону нормального розподілу наробітку $\mathbf{P(T_i)}$ для різних умов експлуатації.

коефіцієнту інтенсивності зношування $к_{інт}$ (3.12) та вірогідності відхилень від закону нормального розподілу наробітку $P(T_i)$ для різних умов експлуатації.

Правила користування номограмою. На горизонтальній осі фази відкладають визначену при діагностуванні фазу $\varphi_д$ (точка А). На вертикальній осі відкладають значення наробітку $T_д$ (точка В). Із точки А проводять вертикальну, а з точки В горизонтальну лінії до їх перетину С. Відшукують також точку перетину продовженої вертикальної лінії з похилою, що характеризує зміну зазору (точка D). Проводять з точки D горизонтальну лінію вліво до перетину з віссю *h* (точка F). Дана точка вказує на фактичне значення зазору в ЦПГ.З точки С вправо проводять лінію паралельну кривим зношення до перетину останньої з вертикальною стінкою номограми (точка I). Горизонталь проведена з даної точки вказує на граничний ресурс $T_д^{гр}$. Різниця між величинами $T_д^{гр}$ і $T_д$ є залишковим ресурсом. Провівши спочатку горизонтальну, а потім похилу лінію, паралельну направляючим з точки I, до перетину з допоміжною прямою $O'O''$ коефіцієнта зношення, отримаємо значення цього коефіцієнта (точка К). Даний коефіцієнт вказує на умови експлуатації двигуна, що діагностується, у порівнянні з середньостатистичним. Якщо даний коефіцієнт перевищує 1, це відповідає погіршеним умовам експлуатації, в порівнянні знову ж таки із середньостатистичними. І навпаки. Продовживши вертикаль до перетину із кривою нормального розподілу (точка М) визначають вірогідність відхилення від закону нормального розподілу P(T).

Як показує досвід підрахунок прогнозу вручну справа досить складна, за винятком лінійного прогнозування, тому без використання засобів автоматизації обчислень неможливо точно і надійно визначати залишковий ресурс.

Використання для даної мети номограми дещо спрощує поставлену задачу однак не вирішує її повністю, так як їй притаманна дискретність. Використання для автоматизації обчислень ПЕОМ дозволяє отримати значення ресурсу з точністю до десятих. Для реалізації вищезазначеного нами розроблено програми для індивідуального прогнозування залишкового ресурсу.

Перша програма написана на мові MathCad2010Pro (додаток Ж), а друга на мові Delphi 5 (текст не приводиться із-за великого обсягу). Загальний вигляд робочого вікна програми написаної мовою Delphi5 приведено в додатку З.

Використання вищезгаданих результатів у вигляді рівнянь регресії експериментальних даних, номограми та розробленого програмного забезпечення дозволило індивідуально визначати технічний стан ЦПГ та прогнозувати залишковий ресурс з досить високою точністю.

4.6. Економічна ефективність результатів досліджень

Визначення економічної ефективності від впровадження віброакустичного методу діагностування ЦПГ вирішується за допомогою єдиного показника – економії річних приведених витрат ($Э_{ПР}$). З точки зору діагностування головним чинником, що впливає на економічні витрати є підвищення точності діагностування.

Величина $Э_{ПР}$ визначається за наступною формулою:

$$Э_{пт} = П_2 - П_1, \tag{4.25}$$

де $П_2, П_1$ – приведені витрати роботи комбайна за умов діагностування новим і базовим варіантах, грн/год.

Для розрахунку економічної ефективності прийнято, що віброакустична діагностика буде застосовуватися в умовах експлуатації.

За базовий варіант прийнято існуючі методи діагностування ЦПГ, розглянуті в розділі 1 (середня похибка діагностування складає 20%).

Сумарна помилка діагностування за розробленим методом визначалася за залежністю:

$$P_2 = \left(\frac{\sum K_\alpha}{\sum K_\alpha + \sum K_\beta} \cdot \alpha + \frac{\sum K_\beta}{\sum K_\alpha + \sum K_\beta} \cdot \beta \right) \cdot 100, \tag{4.26}$$

де $\sum K_\alpha, \sum K_\beta$ –відповідно сумарна кількість помилок першого (хибна тревога) і другого видів (пропуск дефекту).

Результатом розрахунку за залежністю (4.26) є похибка, що складає 1.8%. При цьому експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах. На практиці досягти таких умов досить складно, тому приймалася похибка 10%, тобто дану похибку збільшили більш ніж у 5 раз.

У свою чергу приведені затрати за новим та базовими методами визначаються системою рівнянь:

$$\left| \begin{array}{l} П_2 = П_{БАЗ} - П_{НРЗ} \\ П_1 = П_{НОВ} - П_{НРЗ} \end{array} \right. , \qquad (2.27)$$

де $П_{БАЗ}$ – приведені затрати при зменшеному річному завантаженні комбайна на похибку базового методу;

$П_{НОВ}$ – приведені затрати при зменшеному річному завантаженні комбайна на похибку нового методу;

$П_{НРЗ}$ – приведені затрати при нормативному річному завантаженні комбайна (для умов України цей показник складає ≈170 год.).

Приведені витрати на одиницю роботи лісогосподарської техніки в загальному визначаються залежністю [26]:

$$П_i = C + e \cdot K , \qquad (2.28)$$

де C – сумарні прямі експлуатаційні затрати на комбайн;

e – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (e=0,15);

K –величина капітальних вкладень, грн/га.

$$K = \sum \frac{Б_i}{100 \cdot W_y \cdot t_i} , \qquad (2.29)$$

де $Б_i$ – балансова вартість комбайна для i-го варіанту розрахунку, грн;

W_r – продуктивність агрегату за годину змінного часу, га;

t_i – річне завантаження (нормативне – 170, базовий варіант – 144 та новий варіант – 153) i-го варіанту, год.

Прямі експлуатаційні затрати коштів на одиницю виконаної роботи розраховували для окремої операції дизельної установки за формулою [83]:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 , \qquad (2.30)$$

де C_1 – оплата праці обслуговуючого агрегат персоналу, грн/га;

C_2 – вартість витрачених паливно-мастильних матеріалів, грн/га;

C_3 – відрахування на амортизацію трактора і лісогосподарської техніки, які входять до складу агрегату, грн/га;

C_4 – відрахування на поточний ремонт і технічне обслуговування, грн/га.

Оплата праці персоналу, що обслуговує певний агрегат, становить:

$$C_1 = \frac{m_1 П_1 + m_2 П_2 + ... + m_6 П_6}{W_{зм}}, \qquad (4.31)$$

де m_1, m_2 ..., m_6 – кількість робітників, які обслуговують агрегат окремо по кожній кваліфікації (розряду);

$П_1, П_2, ...П_6$ – оплата праці за норму виробітку робітника кожної кваліфікації, грн;

$W_{зм}$ – змінна продуктивність комбайна, га/зм.

Вартість витрачених паливно-мастильних матеріалів визначають за формулою:

$$C_2 = Ц_к \cdot Q, \qquad (4.32)$$

де $Ц_к$ – комплексна ціна одного кілограма палива, грн;

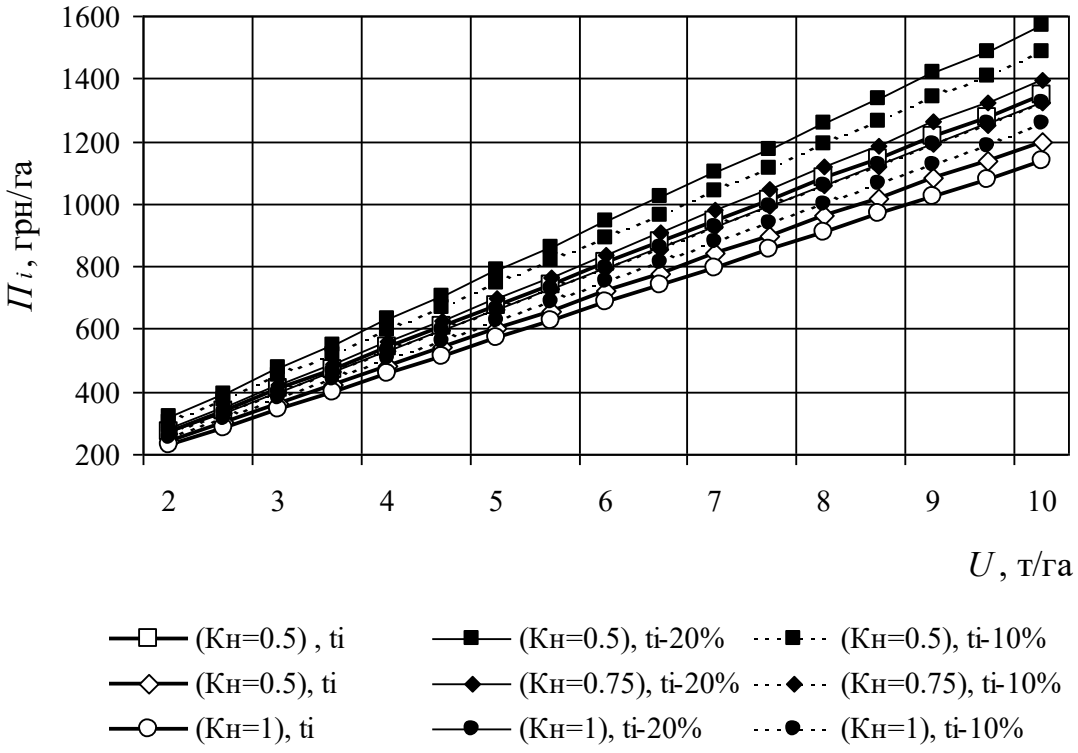
Q – витрата палива, кг/га;

Відрахування на амортизацію комбайна визначали користуючись формулою:

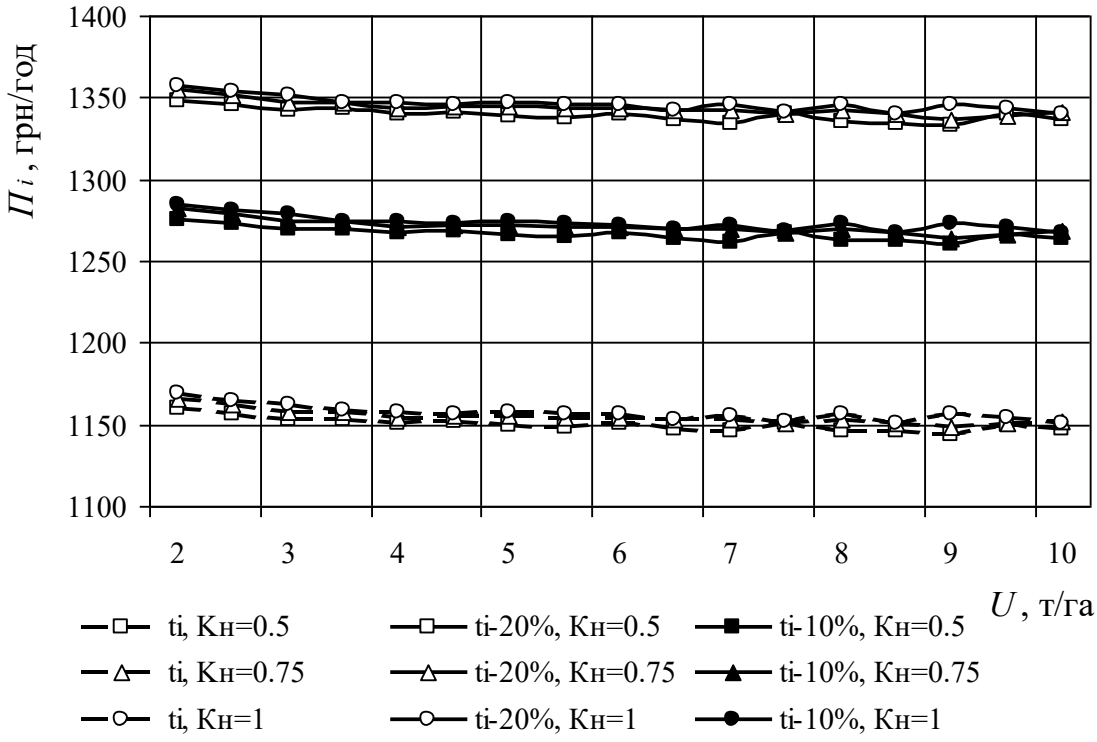
$$C_3 = \sum \frac{Б_i \cdot a_i}{100 \cdot W_y \cdot t_i}, \qquad (4.33)$$

де a_i – норма відрахувань на амортизацію i-ої машини в агрегаті, %.

Відрахування на поточний ремонт та технічне обслуговування визначають за формулою:



а)



б)

Рис.4.19. Зміна приведених витрат $П_i$ на одиницю роботи (а) та на годину роботи (б) комбайна Дон-1500Б від урожайності озимої пшениці U та коефіцієнта готовності комбайна Кн.

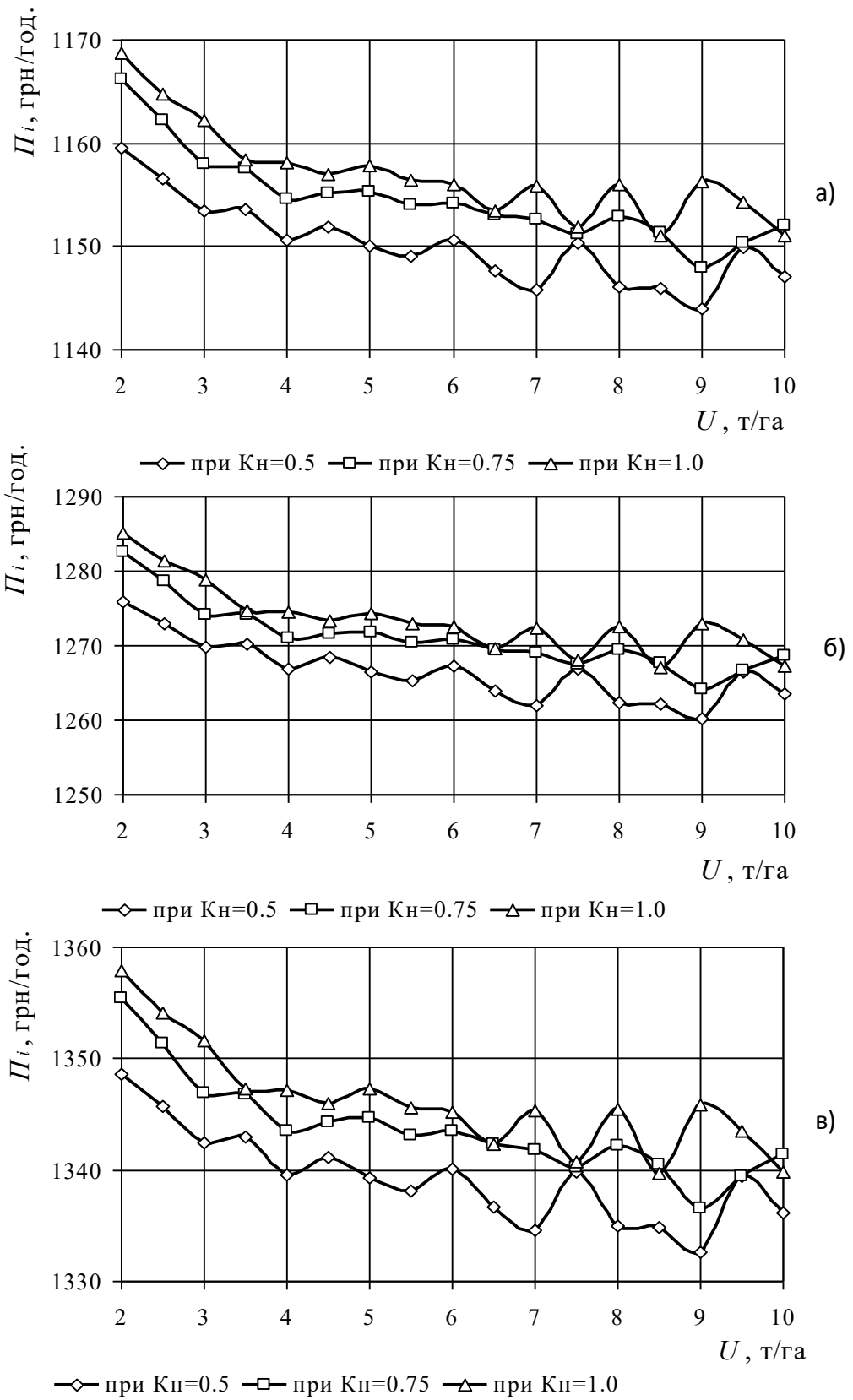


Рис.4.20. Зміна приведених витрат *Пі* від урожайності *U* та коефіцієнта готовності $К_н$ при:

а) нормативному завантаженні t_i;

б) завантаженні t_i;

в) нормативному завантаженні t_i;

$$C_3 = \sum \frac{Б_i \cdot p_i}{100 \cdot W_y \cdot t_i}, \qquad (4.34)$$

де p_i –сумарна норма відрахувань на поточний ремонт та технічне обслуговування машини для лісотехнічних робіт, %.

Результати розрахунку за формулами (4.25– 4.34) наведено на рис.4.19, 4.20 та в додатку Р.

Розрахунок економічної ефективності застосованого віброакустичного методу діагностування в порівнянні з існуючими свідчить, що економія приведених витрат на годину та сезон роботи комбайна, для озимої пшениці, становить відповідно 72.74 грн/год. та 12365.8 грн. При цьому відмічається що дана економія при одних і тих же умовах розрахунку фактично не залежить ні від коефіцієнта надійності машини для лісотехнічних робіт ні від урожайності даної культури.

РОЗДІЛ V
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ НОРМАТИВІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ОБГРУНТУВАННІ ПЕРІОДИЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ

5.1. Терміни відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті

Наслідком планування термінів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт є розподіл їх трудомісткості в регламентному періоді і формування добових трудомісткостей зайнатості мобільних засобів і стаціонарних відділень. Тому особливе значення має спосіб обгрунтування термінів, який повинен сприяти отримання постійних за трудомісткістю добової зайнятості засобів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт.

В основі обгрунтування регламентних термінів лежать нормативні показники періодичності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Вони за стабільного виробничого лісопромислового циклу детерміновані, хоча і можуть у визначених межах відхилятись від встановлених даних. Допустиме відхилення в 5–20% дозволяє переносити терміни проведення відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт, погоджуючи їх з конкретними організаційно-технологічними умовами лісового підприємтсва, і тим самим більш гнучко формувати добові трудомісткості.

На практиці прагнуть до збалансованості трудомісткості добових програм, або ж виникає нерівномірність використання засобів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт, а в дні «пік» відбувається порушення плану-графіка і частина трудомісткості залишається невиконаною. В цілому рівномірний вихід машин для лісотехнічних робіт до відновлення

працездатності є необхідним для підвищення ритмічності лісопромислового виробництва.

Однак при існуючих розмірах парків машин для лісотехнічних робіт забезпечити потрібний баланс дуже ускладено. Тому підтвердженням характерний розподіл кількості ТО-2 при складанні планів-графіків відновлення працездатності лісових МЕЗ в ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група» – рис. 5.1.

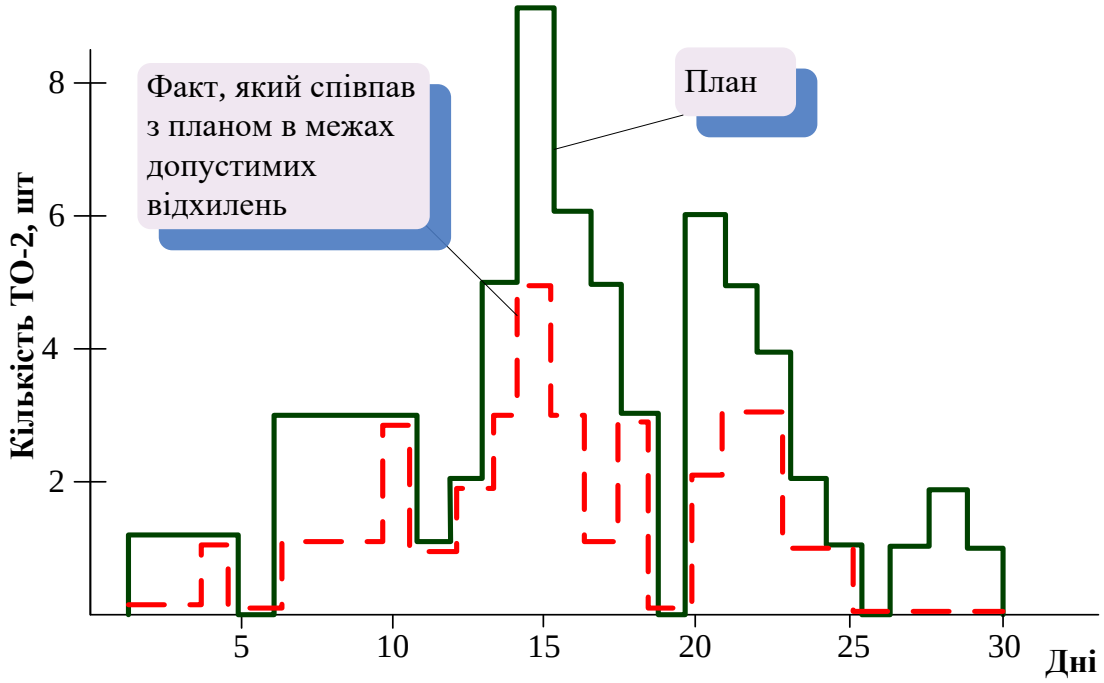


Рис. 5.1. Виконання ТО-2 машин для лісотехнчних робіт в ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група»

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при виконанні ТО-1 в 20% випадків, а ТО-2 в 35% випадків необхідний заявочний ремонт, який за трудомісткістю і фінансовими ресурсами значно перевищує регламентне відновлення працездатності. Загальна перевитрата добових фінансових ресурсів при цьому складає до 418 грн. (станом на 2014 звітний бухгалтерський рік) на один середньооблікова машина для лісотехнічних робіт.

Згладжування на графіках виконують зазвичай в місцях «піков» та «западин» відносно математичного очікування трудомісткості відновлення

працездатності машин для лісотехнічних робіт, тобто виконують ті ж дії, що і при впорядкуванні технологічних операцій, що поступили в довільному порядку. Вимоги на ТО і ремонти, які мають періодичний характер утворюють в часі стохастичний потік, який подібний до відомого в теорії надійності технічних систем кратно-ритмічний потік.

Планування технічної експлуатації машин для лісотехнічних робіт базується на встановленні їх ймовірних потоків відмов і в потребі заявочних (позапланових) ремонтів, які повинні вписуватись в систему відновлення працездатності. При цьому часто не враховуються детерміновані потоки планових заходів самої, на основі яких обгрунтовуються трудомісткості відновлення працездатності.

Аналіз показує, що машини для лісотехнічних робіт підлягають класифікації у співвідношенні з нормативною періодичністю відновлення працездатності і можна виділити чотири класифікаційні кластери – групи (табл. 5.1), як класифікація машин для лісотехнічних робіт за нормативною періодичністю в годинах наробітку технічної експлуатації.

Таблиця 5.1

Класифікація за нормативною періодичністю

Група	Ремонт	ТО-2	ТО-1	Заправлення паливом
1	960	240	50	8
2	1000	250	60	16
3	1200	500	100	24
4	2000	600	200	32

Таке групування (табл. 5.1) покладене в основу вирівнювання потоків вимог і трудомісткість відновлення працездатності в регламенті.

Для дослідження характеру розподілу трудомісткостісті відновлення працездатності в регламентному періоді нами введено систему відліку часу

$g = \overline{1,\infty}$ з кроком S, який відповідає реальним параметрам технічних впливів. Наприклад, для ТО машин для лісотехнічних робіт крок обираємо рівним зміни як величині того ж порядку, що і параметри допустимих відхилень від термінів технічного обслуговування.

Позначимо періодичність відновлення працездатності через $\tau_\beta = \tau_\beta^H / Q_\beta$, де τ_β^H – нормативна періодичність проведення технічного впливу для лісового МЕЗ β; Q_β – тривалість робочого дня машини для лісотехнічних робіт β. Розмірності усіх величин тут і далі встановлені за прийнятою системою відліку.

Кожній групі машин для лісотехнічних робіт P_i (i – номер групи; $i = \overline{1,m}$), виділений з умови:

$$P_i = \{\beta / \tau_\beta = \tau_i\}, \tag{5.1}$$

відповідає окремий потік вимог з періодичністю τ_i.

Інтенсивність окремого потоку $\nu_i(g)$, характеризуюча трудомісткість вимог в одиницю часу, змінюється в часі (рис. 5.2) і кількісно співпадає з числом машин x_{ig}, що підлягають обслуговуванню (в точці часу g):

$$\nu_i(g) = x_{ig} \tag{5.2}$$

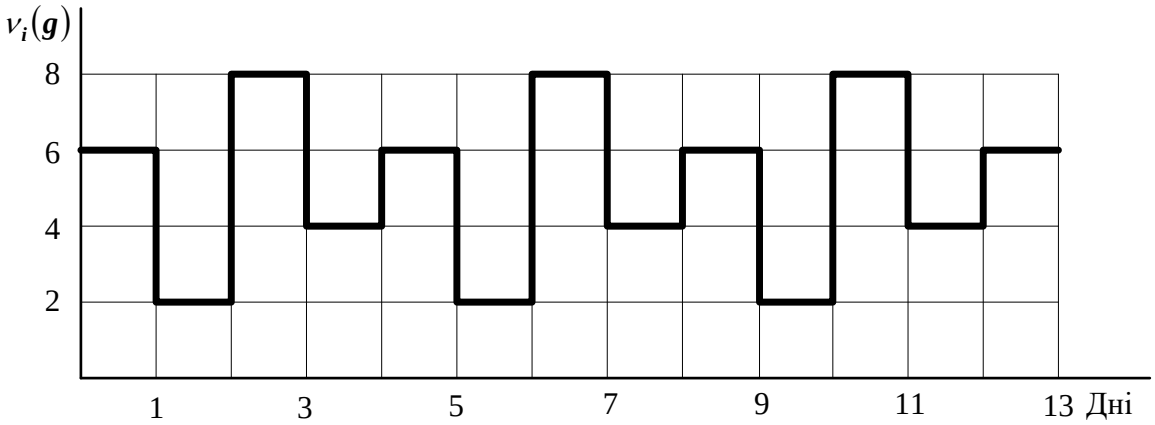


Рис. 5.2. Функція $\nu_i(g)$ при τ_i =4

Функція інтенсивності $\nu_i(g)$ володіє обґрунтованим періодичним характером вимог. За цим інтенсивність вимог в точках часу, відмінно рівно на τ_i одиниць, однакова:

$$\nu_i(g-\tau_i)=\nu_i(g),\ g=\overline{1,\infty} \tag{5.3}$$

Отже, сумарна інтенсивність вимог в кожному інтервалі (в τ_i одиниць) еквівалентна кількості безперервно зайнятих машин для лісотехнічних робіт в групі P_i:

$$\sum_{e=1}^{\tau_i}\nu_i(g-e)=\sum_{e=1}^{\tau_i}x_i,\ g-e=N_i,\ g=\overline{1,\infty}, \tag{5.4}$$

де N_i – кількість машин для лісотехнічних робіт в групі P_i.

При цьому існує рівномірний окремий потік з постійною середньою інтенсивністю вимог, рівний:

$$\nu_i^c=\frac{N_i}{\tau_i}. \tag{5.5}$$

Досягнути постійної інтенсивності вимог загального потоку здійснюємо через розподіл в обслуговуванні рівним по N_i/τ_i машин для лісотехнічних робіт кожної групи $P_i(i=\overline{1,m})$. Тоді загальний потік буде складатись з рівномірних окремих потоків. Тобто в свою чергу є рівномірним. Це випливає із властивостей окремих потоків.

В реальних умовах ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група» відношення між параметрами N_i і τ_i є довільним, тому є не обов’язково кратним, а середня інтенсивність ν_i^c, відповідно не завжди цілочисельною. Тоді умова (5.5) не буде строго виконуватись, так як функція $\nu_i(g)$, згідно виразу (5.2), може приймати значення тільки в цілих числах. Для того щоб врахувати неподільність вимог, нами передбачено мінімальні можливі коливання інтенсивності, що досягається перевіркою умови:

$$\nu_1^c\le\nu_i(g)\le\nu_2^c, \tag{5.6}$$

де ν_1^c, ν_2^c – найближчі найменше і найбільше значення ν_i^c в цілих числах на протязі всього періоду τ_i.

В сукупності умова (5.6) забезпечує своєчасне виконання всіх технічних впливів, а сам режим збережеться і в наступних періодах.

Однак розглядався потік вимог в системі відліку продуктивного робочого часу, тобто не враховувалась тривалість виконання вимог (t_i). Перехід до календарного часу пов'язаний з визначенням кількості безперервно зайнятих машин для лісотехнічних робіт N_i із списку:

$$N_i = N_i^c \cdot K_i^T \tag{5.7}$$

де N_i^c – облікова кількість машин для лісотехнічних робіт в групі P_i; K_i^T – коефіцієнт технічного використання машин для лісотехнічних робіт в групі P_i.

Реально існуючі потоки в ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група» мають змінну інтенсивність. При використанні запропонованого способу обгрунтування трудомісткості відновлення працездатності в регламенті необхідно спочатку домогтися рівномірності загального потоку. Такий перехідний період, на відміну від періоду розгортання класичного кратно-ритмічного потоку, рівного в прийнятих позначеннях $\max \tau_i$, залежить від виду функцій $\nu_i(g)$, існуючих окремих потоків і величин допустимих відхилень, в межах яких можна проводити згладжування плану-графіка. Для досліджуваного випадку величина $max\,\tau_i$ слугуватиме нижньою границею періоду досягнення рівномірності загального потоку.

Таким чином, потік вимог на проведення періодичних відновлень працездатності машин для лісотехнічних робіт володіє важливою регулювальною властивістю, забезпечуючи можливість рівномірного їх виходу на відновлення працездатності. Його доцільно використовувати для розподілу трудомісткості відновлення працездатності в регламентному періоді при вирішенні задачі оперативно-календарного планування експлуатації парку машин для лісотехнічних робіт.

Отже, проведено попередню класифікацію парку машин для лісотехнічних робіт в групі P_i і визначено середню інтенсивність окремих потоків ν_i^c. Далі в процесі вирішення інженерної задачі достатньо простежити за виконанням умови (5.6), включивши його в систему обмежень. Надалі умова рівномірності буде дотримуватись автоматично, без змін нормативних термінів відновлення працездатності.

На стадії виконання заходів з відновлення працездатності при виникненні відхилень від плану-графіка, користуючись отриманим алгоритмом, можна оперативно перерозподілити програми і регулювати графік виконання відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт.

Найбільший ефект запропонований спосіб дає при вирішенні інженерної задачі обгрунтування термінів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті з чітко вираженими періодичними властивостями загального потоку вимог. Тому була розроблена прикладна комп'ютерна програма, яка оформлена окремим модулем і може використовуватись в якості типового блока оптимізації програм відновлення працездатності будь-яких машин для лісотехнічних робіт, охоплених системою, незалежно від їх призначення. Така програма покладена в основу розрахунку місячних планів-графіків відновлення працездатності в ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група» (більш детально в п. 5.3).

5.2. Зміст основних компонентів оптимізації планів-графіків робіт і заходів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

Способи відновлення працездатності розрізняються за місцем їх виконання (на об'єктах робіт, виробничій базі підприємтсва, в мобільних «профілакторіях») і пов'язані із забезпеченістю трудовими і фінансовими ресурсами. При спільному розрахунку планів-графіків лісопромислових робіт і заходів з відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт слід передбачати ефективні способи виконання цих заходів в залежності від структури робіт і організації служб технічної експлуатації.

Для обліку ресурсів стаціонарних відділень і мобільних засобів, а також інших засобів ТО, достатньо вказати їх часткову участь у виконанні добових програм δ_ρ (де ρ – номер способу; $\sum \delta_\rho = 1$) і відобразити його в умові (5.4). В результаті рівномірно розподілені добові програми відновлення працездатності будуть додатково вирівняні за способами виконання.

Критерієм оптимізації вирішення загальної задачі є показник собівартості експлуатації парку машин для лісотехнічних робіт, відображаючи зміст основних компонентів оптимізації планів-графіків робіт і заходів відновлення працездатності. Кожен компонент діє на певну частину витрат в складі собівартості. По відношенню витрат до змінних шуканого рішення їх слід розбити на ряд груп: витрати на виробництво робіт (за винятком перерахованих нижче); витрати на перебазування; витрати на ТО, які залежать від способу виконання; витрати на ТО, які залежать від терміну виконання; витрати від недовантаження машин в плановому періоді.

Таке групування не суперечить загальноприйнятій структурі витрат. Отже, для парку машин $\beta = \overline{1,N}$ на період $G = \{1,...,g,...,n^g\}$, де g – номер робочого дня, задана робоча програма робіт Π у вигляді територіально-роззосереджених об'єктів робіт $\{\lambda, K, l\} \in \Pi$ із встановленими термінами виконання $[T_\lambda^H, T_\lambda^K]$. Кожен лісовий МЕЗ на початку планового періоду знаходиться на вихідному об'єкті O_β, може бути використаний після завершення робіт попереднього планового періоду на ньому починаючи з часу T_β^H, якому відповідає на ТО t_β^H, і закінчуючи часом T_β^K. Кожна машин для лісотехнічних робіт повинен пройти чергове ТО типу $S \in \Pi_\beta^{TO}$, де $\Pi_\beta^{TO} = \{1,...S,...,n^S\}$ – підмножина ТО машин для лісотехнічних робіт β в плановому періоді, з трудомісткістю $t_{\beta S}$ люд.-год через $\tau_{\beta S}$ маш.-год роботи після останнього ТО в попередньому плановому періоді, з врахуванням допустимих відхилень в ту чи іншу сторону $\tau_{\beta S}^+$ і $\tau_{\beta S}^-$ маш.-год. В сукупності заходи відновлення працездатності утворюють детермінований

потік вимог, який повинен підтримуватись на постійному рівні із середньою інтенсивністю ν_i^c, заданою для груп, діючих машин для лісотехнічних робіт P_i, де $i=\overline{1,m}$ – номер групи з однаковою періодичністю ТО: $P_i = \left\{ \beta \big/ \tau_{\beta S} = \tau_i \right\}$, де $\tau_{\beta S}$ – нормативна періодичність ТО S машин для лісотехнічних робіт β в маш.-дні. Кожне ТО може бути виконане одним із способів ρ, приналежним множині допустимих способів ТО Q^{TO}. Витрати при цьому складатимуть $C_{\beta S\rho}^{TO}$ грн., а періодичність $t_{\beta S\rho}^{TO}$ год. Також відомі усі допустимі способи робіт Q, матриці тривалості $\|t_{\beta\lambda}\|$ в годинах та витрат $\|C_{\beta\lambda}\|$ в гривнях на перебазування машин між об'єктами лісопромислових робіт, витрати в гривнях від 1 маш.-год простою машини із-за недовантаження $C_\beta^{пр}$, $\beta=\overline{1,N}$, функція штрафів в гривнях із-за недотримання термінів ТО $C_{\beta S}^{TO}(T_{\beta S}^{TO})$, $\beta=\overline{1,N}$, $S \in \Pi_\beta^{TO}$.

На виконання ТО і перебазування машин для лісотехнічних робіт виділені ресурси робочого часу в частковій участі δ_ρ для кожного способу ТО $\rho=\overline{1,n^\rho}$ і в натуральному виразі $\Phi_g^{ПБ}$ (год) для засобів транспортування на усі дні планового періоду $g=\overline{1,n^g}$. Необхідно визначити оптимальне (за критерієм собівартості) розклад експлуатації машин для лісотехнічних робіт M_β, $\beta=\overline{1,N}$, який включає вихідний об'єкт робіт Q_β, підмножину робіт Π_β з вимогами $\bigcap\beta$ $\Pi_\beta=\varnothing$ і множину ТО Π_β^{TO}: $M_\beta = O_\beta \cup \Pi_\beta \cup \Pi_\beta^{TO}$. Можливий вигляд шуканого розкладу за змінними параметрами розкладу: $T_{\beta\lambda}$ – час початку виконання роботи λ лісовим МЕЗ β, год; $T_{\beta\lambda}^{Д}$ – час доставки машини для лісотехнічних робіт β на об'єкт λ, год; $T_{\beta S}^{TO}$ – час початку S-го в порядку проходження ТО машин для лісотехнічних робіт β, год.

Функція мети – мінімум собівартості експлуатації парку машин для лісотехнічних робіт:

$$\sum_{\beta=1}^{N}\left\{\sum_{(\lambda,K\in\Pi_\beta)}\left[C_{\beta\lambda K}+C_{\beta K}\right]+C_{\beta}^{пр}t_{\beta}^{пр}+\sum_{\left(S,\rho,K\in\Pi_\beta^{ТО}\right)}\left[C_{\beta S\rho K}^{то}+f(T_{\beta S}^{ТО})\right]\right\}\to\min, \qquad (5.8)$$

де $t_{\beta}^{пр}$ – час простою машин для лісотехнічних робіт β із-за недовантаження в плановому періоді, маш.-год. Система обмежень: програма робіт, встановлена календарними планами лісопромислового підприємства, повинна бути виконана повністю:

$$\bigcup_{\beta}\Pi_\beta=\Pi, \qquad (5.9)$$

в розклад повинні ввійти допустимі способи робіт:

$$(\beta,\lambda)\in Q,\ \forall_\lambda\in\Pi_\beta,\ \beta=\overline{1,N}, \qquad (5.10)$$

роботи повинні виконуватись в задані терміни:

$$T_\lambda^H\le T_{\beta\lambda},\ T_{\beta\lambda}+t_{\beta\lambda}\le T_\lambda^K,\ \beta=\overline{1,N},\ \lambda\in\Pi_\beta, \qquad (5.11)$$

в розклад повинні ввійти допустимі способи виконання ТО:

$$(\beta,S,\rho,\lambda)\in Q^{ТО},\ \forall_\lambda\in\Pi_\beta,\ (S,\rho)\in\Pi_\beta^{ТО},\ \beta=\overline{1,N}, \qquad (5.12)$$

відновлення працездатності повинно проводитись у певні інтервали часу:

$$\tau_{\beta S}-\tau_{\beta S}^{-}\le t_\beta^H+T_{\beta S}^{ТО}-t_{\beta S}^{ВМ}\le\tau_{\beta S}+\tau_{\beta S}^{+},\ \beta=\overline{1,N}, \qquad (5.13)$$

де $t_{\beta S}^{ВМ}$ – тривалість усіх простоїв з початку планового періоду до початку відновлення працездатності S лісового МЕЗ β, маш.-год; потреба в перебазуванні машин для лісотехнічних робіт повинна бути забезпечена ресурсами робочого часу засобів транспортування:

$$\sum_{(\beta,\lambda,K)\in\Pi_g^{ПБ}}t_{\beta\lambda K}\le\Phi_g^{ПБ},\ g=\overline{1,n^g}, \qquad (5.14)$$

де $\Pi_g^{ПБ}$ – програма перебазування на робочий день g; потік вимог на проведення відновлення працездатності повинен підтримуватись на постійному рівні, гарантуючому рівномірний розподіл об’ємів добових програм відновлення працездатності під час і за способами виконання:

$$\nu_1^c\delta_\rho\le x_{i\rho g}\le\nu_2^c\delta_\rho,\ i=\overline{1,m},\ \rho=\overline{1,n^\rho} \qquad (5.15)$$

де $x_{i\rho g}$ – кількість машин для лісотехнічних робіт з групи P_i, призначених на відновлення працездатності способом ρ в робочий день g; v_1^c, v_2^c – найближчі менші і більші показники v_i^c в цілих числах; обмеження на змінні:

$$T_\lambda^H \le T_{\beta\lambda},\ T_{\beta\lambda}^Д,\ T_{\beta S}^{TO} \le T_\beta^K,\ T_{\beta\lambda}^Д \le T_{\beta\lambda}^K,\ \beta=\overline{1,N},\ \lambda \in П_\beta,\ S \in П_\beta^{TO} \qquad (5.16)$$

За формальним змістом інженерна задача сформована за виразами (5.8)–(5.16) має адекватність за положеннями області теорії розкладів, в частині класу задач виконання незалежних робіт паралельними технічними системами, якими є машини для лісотехнічних робіт. Відомими методами її вирішити нами не вдалось. Тому розроблено авторський алгоритм, якій діє за схемою метода «розгалужень і меж». Отже, шлях Θ – тривалість робочого дня (маш.-год), а Z – кількість, яка складається із символів $П^П, O_\beta, P(\lambda)$, $TO(S,\rho,K)$, $ПБ(\lambda,K)$, де $\beta=\overline{1,N}$; $(\lambda,K)\in П$; $(S,\rho,K)\in Q^{TO}$. Розкладом буде називатись відображення $F:\overline{1,N}\times\overline{1,n^g}\ \ \Theta \to Z$, при цьому символам Z надається наступний сенс: якщо $F(\beta,t)=ПП$, то машин для лісотехнічних робіт β в момент часу t, відповідно, працює на об'єкті λ, проходить ТО S способом ρ на об'єкті K, перебазується з об'єкта λ на об'єкт K.

Сукупність умов, сформованих в системі обмежень задачі за виразами (5.9)–(5.16), позначена як ДОП і буде називатись умовами допустимості. Розклад F, що задовольняє умовам допустимості ДОП, є допустимим розкладом. Для кожного допустимого розкладу F і кожного $\beta=\overline{1,N}$ визначені множини $П_\beta^{ПБ}(F)$ і $П_\beta^{TO}(F)$. Множина $П_\beta^{ПБ}(F)$ складається із усіх пар (λ,K), таких, що для деякого t $F_\beta(t)=ПБ(\lambda,K)$.. Множина $П_\beta^{TO}(F)$ складається із усіх сполучень (S,ρ,K), таких що для деякого t $F_\beta(t)=TO(S,\rho,K)$.

Цільова функція $L(F)$ визначається наступною рівністю:

$$\mathrm{L}(F)=\sum_{\beta=1}^{N}\left\{\sum_{(\lambda,K)\in П_\beta^{ПБ}(F)}(C_{\beta\lambda K}+C_{\beta K})+C_\beta^{ПР}t_\beta^{ПР}+\sum_{(S,\rho,K)\in П_\beta^{TO}(F)}\left[C_{\beta S\rho K}^{TO}+f(T_{\beta S}^{TO})\right]\right\}, \qquad (5.17)$$

де $t_{\beta}^{ПР}$ – сумарний час простоїв машин для лісотехнічних робіт β (тобто $t_{\beta}^{ПР} = |\{П\}|$); $T_{\beta S}^{TO}$ – час початку ТО S машин для лісотехнічних робіт β (тобто $T_{\beta S}^{TO} = min\{t : F_{\beta}(t) = TO(S,\rho,K)\}$ для усіх ρ і K). Завдання полягає в тому, щоби знайти допустимий розклад $L(\hat{F}) = \min L(F)$. Визначивши поняття розкладу як відображення, що складають кожну пару (β,t) з деяким елементом множини Z, необхідно впорядкувати множину пар (β_1,t_1), якщо $t_0 < t_1$ або ж $t_0 = t_1$ і $\beta_0 < \beta_1$, тобто $(\beta_0,t_0) < (\beta_1,t_1)$. Пара $(\beta_1,t_1) = (\beta,t) \oplus 1$, якщо $(\beta_1,t_1) > (\beta,t)$ і не існує пари (β_2,t_2), такий, що $(\beta_1,t_1) > (\beta_2,t_2) > (\beta,t)$. З іншої сторони, $(\beta_1,t_1) = (\beta,t) \oplus 1$, якщо $(\beta,t) = (\beta,t) \oplus 1$. Вважається, що задано окреме (β_0,t_0) – розклад, якщо для усіх $(\beta,t) < (\beta_0,t_0)$ визначено $F_{\beta}(t) \in Z$. Окреме (β_0,t_0) – розклад допустимий, якщо задовольняє умовам ДОП. Розклад F називається продовженням окремого (β_0,t_0) – розклад, якщо $\forall(\beta,t) < (\beta_0,t_0)$ $\overline{F}_{\beta}(t) = F_{\beta}(t)$. Для окремого допустимого (β_0,t_0) – розклад F множини $П_{\beta}^{ПБ}(F)$, $П_{\beta}^{TO}(F)$ визначені наступними умовами:

$$(\lambda,K) \in П_{\beta}^{ПБ}(F), \text{ якщо } \exists t : F_{\beta}(t) = ПБ(\lambda,К); \tag{5.18}$$

$$(S,\rho,K) \in П_{\beta}^{TO}(F), \text{ якщо } \exists t : F_{\beta}(t) = ПБ(\lambda,К). \tag{5.19}$$

Також визначені $T_{\beta S}^{TO}(F)$ і $t_{\beta S}^{ПР}(F)$:

$$T_{\beta S}^{TO}(F) = min\{t | F_{\beta}(t) = TO(S,\rho,K)|\} \text{ для деяких } \rho \text{ і } K: \tag{5.20}$$

$$t_{\beta}^{ПР}(F) = |\{t | F_{\beta}(t) = ПП\}|.$$

Будь-який допустимий розклад можна розглядати як частково допустиме (N,n^g,Θ) – розклад. Нехай знову F – окремо допустиме (β_0,t_0) – розклад, а $\overline{F}$ – його допустиме продовження. Оцінюється число ТО NTO, яке необхідно виконати за розкладом $\overline{F}$ без врахування розкладу F. Для цього визначено велику кількість робіт $П^R(F)$: $\lambda \in П^R(F)$, якщо $\forall K(\lambda,K) \in П_{\beta}^{ПБ}(F)$, а також числа $NTO^{+}(F)$ і $NTO^{-}(F)$:

$$NTO^{+}(F)=\left[\sum_{\lambda\in\Pi}\max_{\beta} t_{\beta\lambda}\right]\Bigg/\left[\min_{\beta,S}(\tau_{\beta,S}-\tau_{\beta,S}^{-})\right]; \qquad (5.22)$$

$$NTO^{-}(F)=\left[\sum_{\lambda\in\Pi^{R}}\min_{(F)} t_{\beta\lambda}\right]\Bigg/\left[\max_{\beta,S}(\tau_{\beta,S}+\tau_{\beta,S}^{+})\right]. \qquad (5.23)$$

Величини $NTO^{+}(F)$ і $NTO^{-}(F)$ є відповідно верхньою і нижньою межею кількості ТО в розкладі F :

$$NTO^{-}(F)\le NTO\le NTO^{+}(F). \qquad (5.24)$$

Далі необхідно оцінити число $NПП$ – час простоїв машин в розкладі $\overline{F}$ без відліку простоїв окремо допустимого розкладу F . Нижньою межею часу простоїв машин є величина $NПП^{-}(F)$, яка визначається виразом:

$$NПП^{-}(F)=Nn^{g}\Theta-Nt_{0}-\sum_{\lambda\in\Pi^{R}(F)}\max t_{\beta\lambda}-NTO^{+}(F)\max t_{\beta S\rho}^{TO}-\sum_{\lambda\in\Pi^{R}(F)}\max t_{\beta\lambda K}\,. \qquad (5.25)$$

В кінці необхідно оцінити число C – витрати на перебазування машин і виконання робіт в розкладі $\overline{F}$, які не були враховані в окремо допустимому розкладі F. Для цього використовуються конструкції. Допустимо, $\tilde{\Pi}(F)=\{K|\forall\lambda(\lambda,K)\notin\Pi_{\beta}^{ПБ}(F)\}$, а $C^{-}(F)=\sum_{\lambda\in\tilde{\Pi}(F)}\min_{\beta}C_{\beta\lambda K}^{P}+\sum_{\lambda\in\Pi^{R}(F)}\min_{\beta,K}\left[C_{\beta\lambda K}^{P}-\min_{\beta,K}C_{\beta\lambda K}^{P}\right]$, де $C_{\beta\lambda K}^{P}=C_{\beta\lambda}+C_{\beta\lambda K}$. Величина $C^{-}(F)$ є нижньою межею витрат на перебазування машин і виконання робіт.

Кожний компонент цільової функції отримав свою оцінку, і може бути дана комплексна оцінка розкладу F на будь-якому етапі його формування.

Якщо $\overline{F}$ – допустиме продовження окремо допустимого (β_0,t_0) – розклад F, то

$$\begin{aligned}L(\overline{F})\ge L_1(F)+C^{-}(F)+NTO^{-}(F)\left[\min C_{\beta S\rho K}^{TO}+\min_{(\beta,S,t)\in G_{\beta S}} f(T_{\beta S}^{TO})\right]+\\ +\max\left[0,NПП^{-}(F)\right]\min C_{\beta}^{ПР}=L^{-}(F)\end{aligned}, \qquad (5.28)$$

де $G_{\beta S}=\left[\tau_{\beta S}-\tau_{\beta S}^{-},\tau_{\beta S}+\tau_{\beta S}^{+}\right]$.

Алгоритм.

Крок 1. Положити. $L \to \infty$, $\beta_0 = 1, (t_0 = 1), V_{\beta_0}(t_0) = Z$. Переходимо до виконання кроку 2.

Крок 2. З'ясувати, лише множину $V_{\beta_0}(t_0)$ або ні. Якщо $V_{\beta_0}(t_0) \neq 0$, перейти до виконання кроку 3, в іншому випадку – крок 8.

Крок 3. Використовуючи правило розгалуження, вибрати елемент $\beta \in V_{\beta_0}(t_0)$ і покласти $F_{\beta_0}(t_0) = \beta$, $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) - \{\beta\}$. Перейти до виконання кроку 4.

Крок 4. Перевірити чи отримане окреме $V_{\beta_0}(t_0)$ – розклад допустиме. Якщо так, то перейти до виконання 6, якщо ні – крок 5.

Крок 5. Обчислити $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) \oplus 1$ і перейти до виконання кроку 2.

Крок 6. Обчислити $L^-(F)$. Якщо $L^-(F) \geq L$, то покладемо $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) \oplus 1$ і перейти до виконання кроку 2. Якщо ж $L^-(F) < L$ то $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) \oplus 1$, $V_{\beta_0}(t_0) = Z$ і перейти до виконання кроку 7.

Крок 7. Якщо $V_{\beta_0}(t_0) \leq (N, n^g \Theta)$ то перейти до виконання кроку 2, якщо $V_{\beta_0}(t_0) > (N, n^g \Theta)$, запропонуємо $\widetilde{F} = F$, $L = L(\widetilde{F})$, $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) \oplus 1$ і перейти до виконання кроку 6.

Крок 8. Якщо $t_0 = 0$ і розклад $\widetilde{F}$ визначено, зо задача має рішення і $\widetilde{F}$ є оптимальним розкладом. Якщо $\widetilde{F}$ не визначено, то умови ДОП несумісні і задача має рішення. Якщо $t_0 > 0$, приймемо $V_{\beta_0}(t_0) = V_{\beta_0}(t_0) \oplus 1$ і перейти до кроку 2.

Реалізація запропонованого алгоритму відповідає реальним умовам експлуатації парку машин для лісотехнічних робіт в підрозділах механізації ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група».

Завдання в постановці (5.8)–(5.16) адекватно відображає загальний процес використання парку лісових машин для лісотехнічних робіт за часом. Крім свого прямого призначення запропонована алгоритмічна модель може бути застосована для вирішення інших задач оптимального використання парку

машин для лісотехнічних робіт, забезпечуючи певну масовість розробленого алгоритму.

Вважаючи застосованими ті чи інші моделі, можна отримати їх оптимальне рішення за прийнятим критерієм стану. Наприклад, вирішити задачу визначення областей ефективного застосування способів виконання ТО, використовуючи заданий блок-генератор варіантів цільової участі останніх. Аналогічно можуть бути вирішені і інші задачі (розрахунок потреби в засобах експлуатації машин для лісотехнічних робіт, визначення складу парку машин для лісотехнічних робіт під задану програму лісопромислових робіт та ін.).

5.3. Системність прийняття рішень відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті

Системність прийняття рішень при управлінні періодичністю відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті – це багаторівнева система, призначена для організації та управління технічним обслуговуванням машин для лісотехнічних робіт, яка заснована на оцінці технічного стану об’єкта управління на стадії експлуатації та враховує їх відмови у виробничій ситуації, а також трудові і фінансові витрати.

Аналіз вимог, які пред’являються до системності прийняття рішень відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті, дозволяє сформулювати принципи її побудови: функціональний, модульний та ієрархічний.

Функціональний принцип відображає збір інформації, її зберігання, обробку даних, прогнозування і прийняття рішень. Перераховані можливості охоплюють всі сфери експлуатації машин для лісотехнічних робіт.

«Прийняття рішень» є специфічною функцією в системі відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт, яка відрізняє її від прикладних комп’ютерних систем. Ця функція призначена для вибору оптимального вирішення проблемної ситуації, пов’язаної з порушенням нормальної експлуатації машин для лісотехнічних робіт. Для здійснення цієї функції системність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

включає в себе комплекс моделей розрахунку і прийняття рішень, а також базу даних, яка забезпечує їх інформацією.

Модульний принцип означає, що кожна з використаних в системі моделей являє собою окремий модуль, а інформація зберігається в окремих файлах даних. Використання модульного принципу забезпечує можливість редагування і доповнення складу даних у процесі експлуатації машин для лісотехнічних робіт при управлінні періодичністю відновлення їх працездатності в раціональних межах витрат фінансових ресурсів, трудових сил і робочого часу обслуговуючого персоналу.

Ієрархічний принцип відображає прийнятий в системі спосіб організації збору, зберігання, обробки та аналізу інформації, порядок пошуку рішень проблемних ситуацій, а також рівні використання системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт.

Загальна концепція вибудови системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт базується на ієрархічному принципі, який передбачає розподіл функцій управління між взаємопов’язаними структурними рівнями: інформаційним, стратегічним, тактичним і виконавчим. Ієрархічна організація системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт забезпечує збір даних про об’єкт управління на інформаційному рівні, вибір функцій розподілу і стратегій відновлення працездатності на стратегічному рівні, формування критеріїв якості функціонування машин для лісотехнічних робіт і їх кількісні оцінки на тактичному рівні, а також управління періодичністю відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в процесі реалізації інженерних заходів на виконавчому рівні. При цьому людина-оператор є ланкою системи, яка контролює її функціонування.

На вхід системи надходить інформація від людини-оператора та з бази даних. На виході такої системності за Ієрархічною структурою (рис. 5.3) отримуємо такі відомості: оптимальну періодичність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт, екстремальні значення

технічних і економічних показників якості функціонування системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт.

Структура системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт розроблена з урахуванням сучасних лісопромислових виробничих вимог до подібного роду систем та аналізу існуючих типових структур. Її особливістю є поділ на взаємозалежні і взаємодіючі частини.

Системність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт реалізується у вигляді прикладної програмної технології за структурною схемою рис. 5.4. Вона (рис. 5.4) містить два основних модуля: статистичний і розрахунковий, і включає в себе велику кількість алгоритмів, об’єднаних в запропонованій моделі, які дозволяють вирішувати поставлені інженерні завдання.

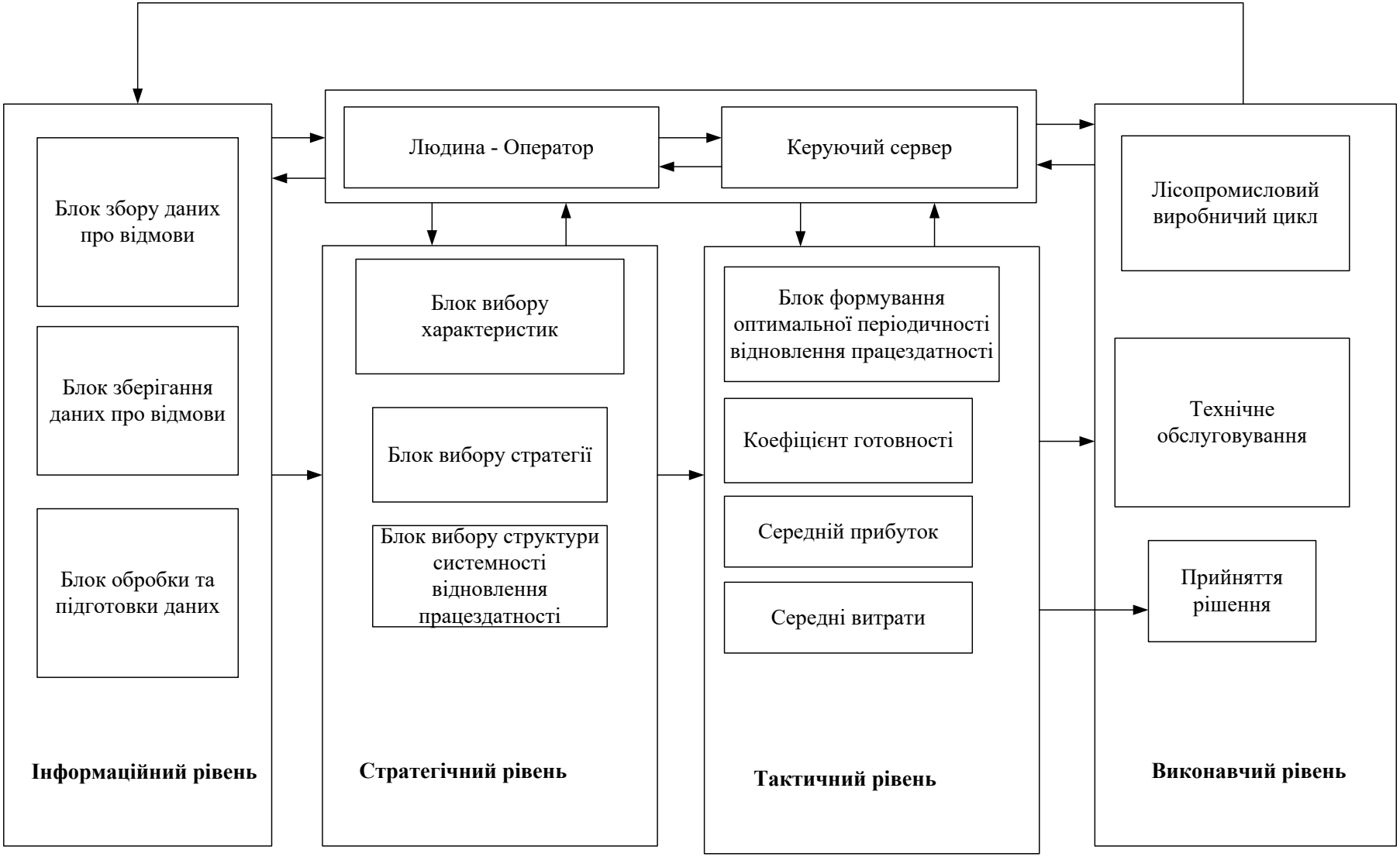


Рис. 5.3. Ієрархічна структура системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

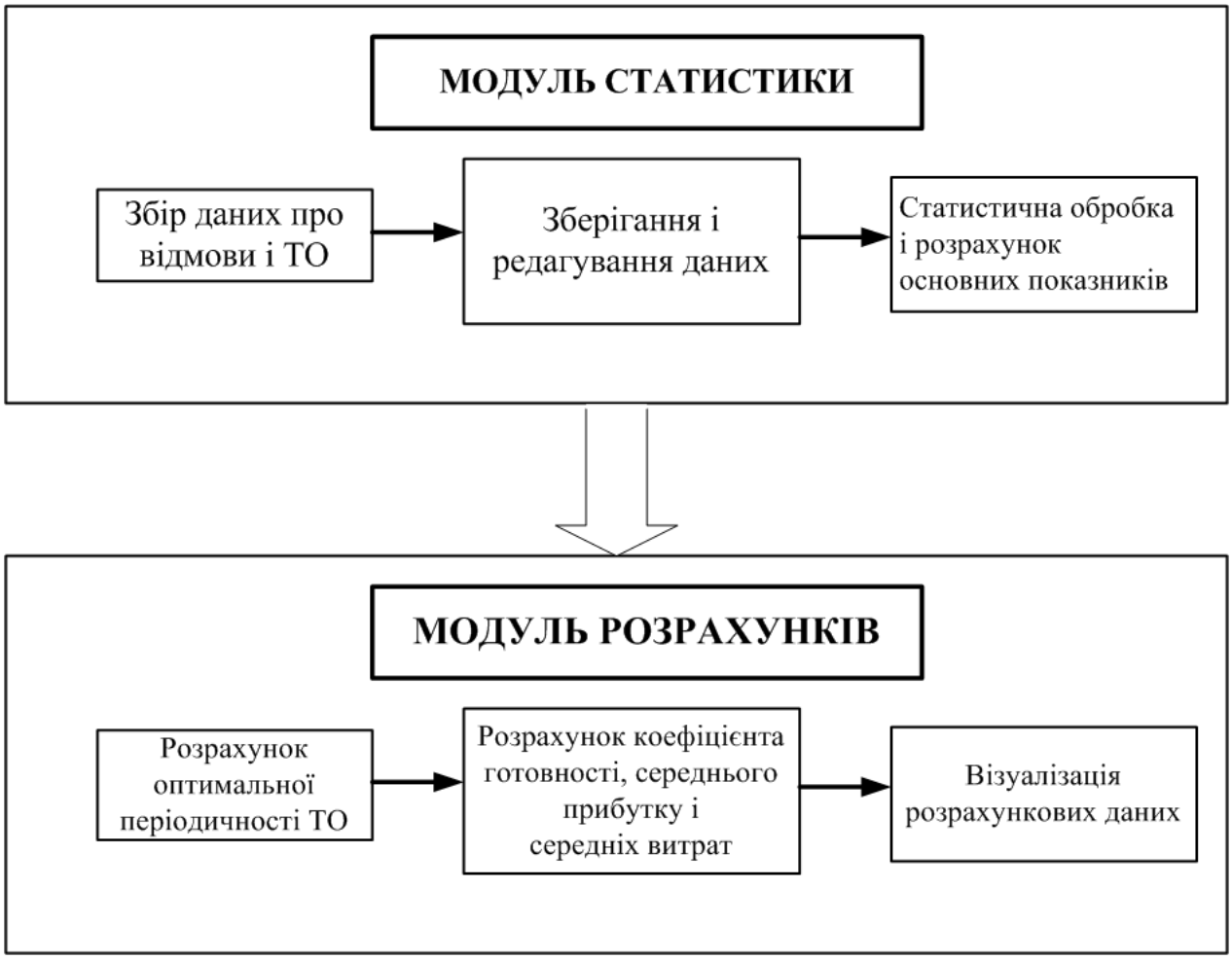


Рис. 5.4. Структурна схема системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

5.4. Прикладні положення реалізації та функціональні можливості системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

Виходячи з сучасної практики розробки та впровадження до лісопромислового виробництва інноваційних проектів, запропонована системність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт орієнтована на кінцевого користувача – інженера-конструктора, інженера-проектувальника, інженера-експлуатаційника, які не є кваліфікованими науковцями. Тому застосовано зручний багатовіконний інтерфейс, що полегшує роботу з проектом.

Базовий варіант системності відновлення працездатності лісових МЕЗ передбачає, що у користувача є наступна інформація: кількість компонент системи та їх взаємозв’язок, тобто структура. Тоді забезпечується збір статистики по відмовах, проведення її обробки, а також визначення вибіркових математичних очікувань, вибіркової дисперсії та інших характеристик; визначення законів розподілу часу безвідмовної роботи, часу відновлення і технічного обслуговування досліджуваної машини для лісотехнічних робіт.

Системність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт при управлінні періодичністю, що представлена на рис. 5.3 зреалізована через операційне середовище користувача Windows і включає авторський модуль діалогу «ForestMashinery» (рис. 5.5).

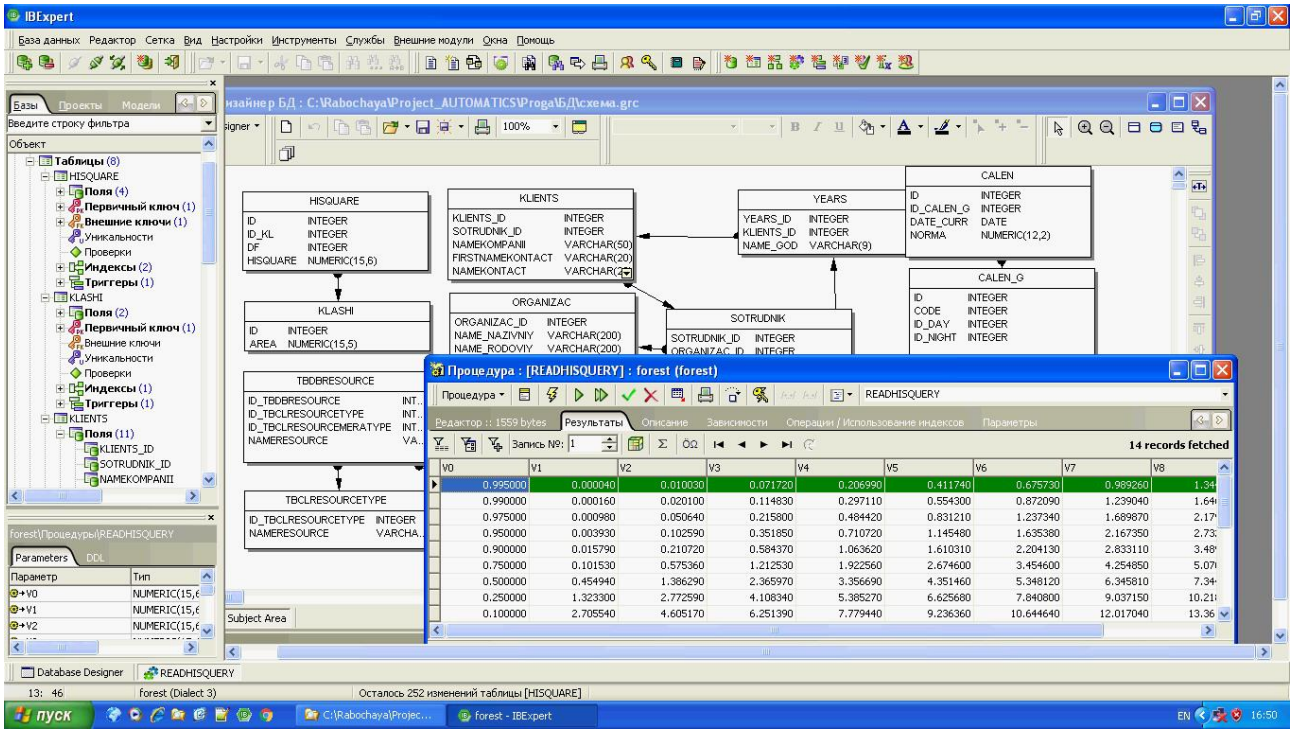


Рис. 5.5. Діалогове вікно проектування та модель «ForestMashinery»

Додатково для роботи клієнтів необхідні мережа Enternet (протокол TCP/IP), а також комплект мережевого обладнання (комутатор HUB, кабелі, конектори). Програма працює з базою даних (БД) (рис. 5.5). В "ForestMashinery" використовується безкоштовний сервер Firebird 2.1.

Комплекс забезпечує роздільний вхід кожного клієнта з роздільними правами. Вхід здійснюється за логіном і паролем. При використанні передбачається, що у користувача є наступна інформація: кількість компонент системи та їх взаємозв'язок, тобто структура відновлення працездатності (рис. 5.6). В якості операційного середовища користувача можливе використання Windows XP, 7, 8.1 і включає модуль діалогу, організований в зручній для користувача формі, що дає уяву про систему і вирішує в основному завдання попереднього вибору структури і стратегії відновлення працездатності.

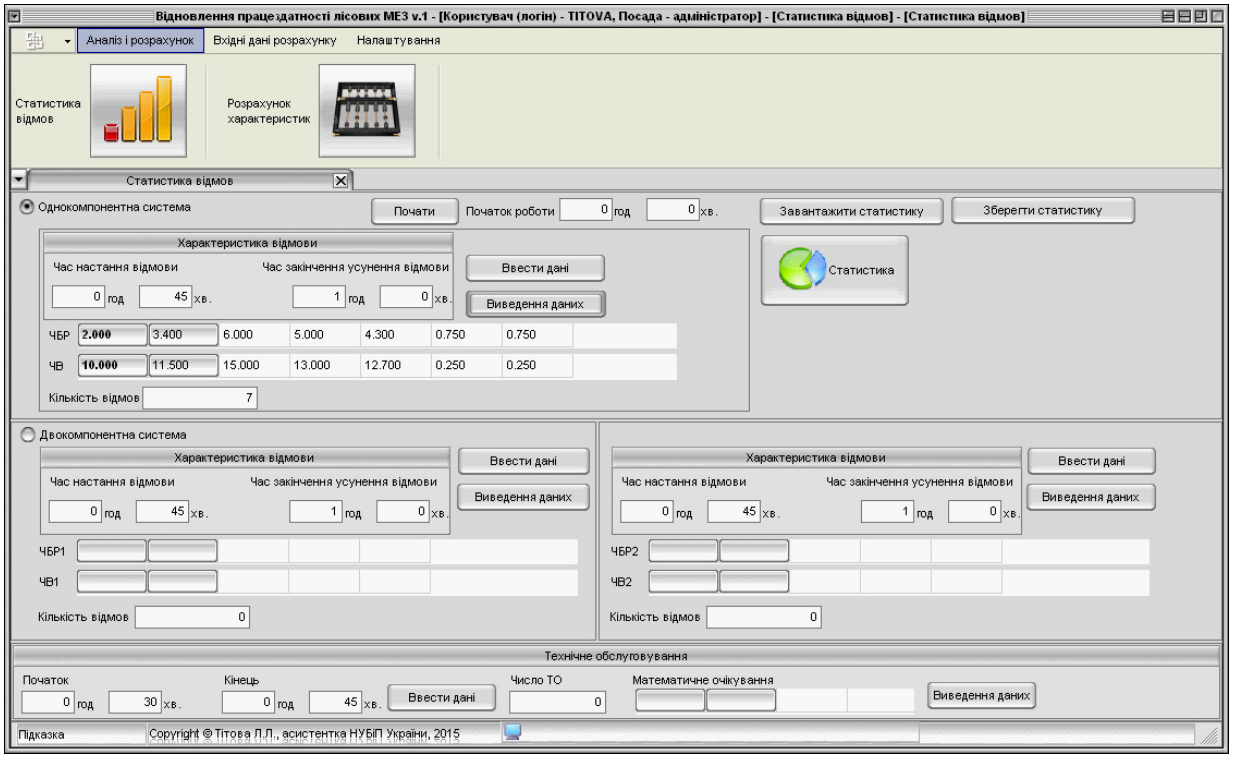


Рис. 5.6. Модуль збору статистичних даних про відмови

Модуль розрахунку (рис. 5.7) дозволяє вибрати структури (рис. 5.8), стратегію (за наробітком, календарну, з резервом часу та з включеною чи відключеною компонентою), закон розподілу та економічні показники функціонування відновілення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Розроблена програма написана мовою високого рівня: Object Pascal в інтегрованому середовищі розробника – Embarcadero® *Delphi* XE7 за модульним принципом. Незалежність різних модулів програми один від одного робить їх універсальними, забезпечуючи багаторазове використання в різних

додатках, які просто комплектуються для виконання того чи іншого завдання. Після комплектування програма заново компілюється і готова до використання.

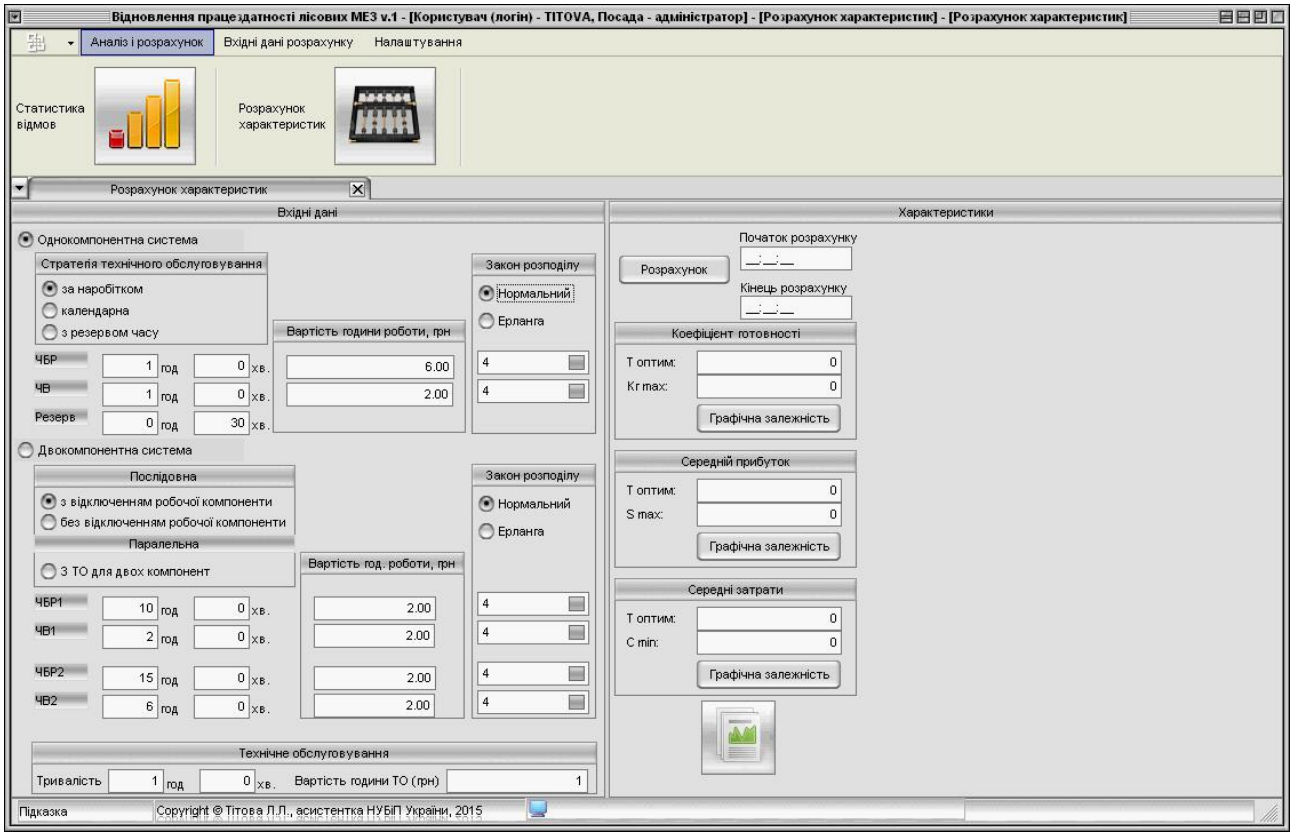


Рис. 5.7. Модуль розрахунку основних характеристик системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

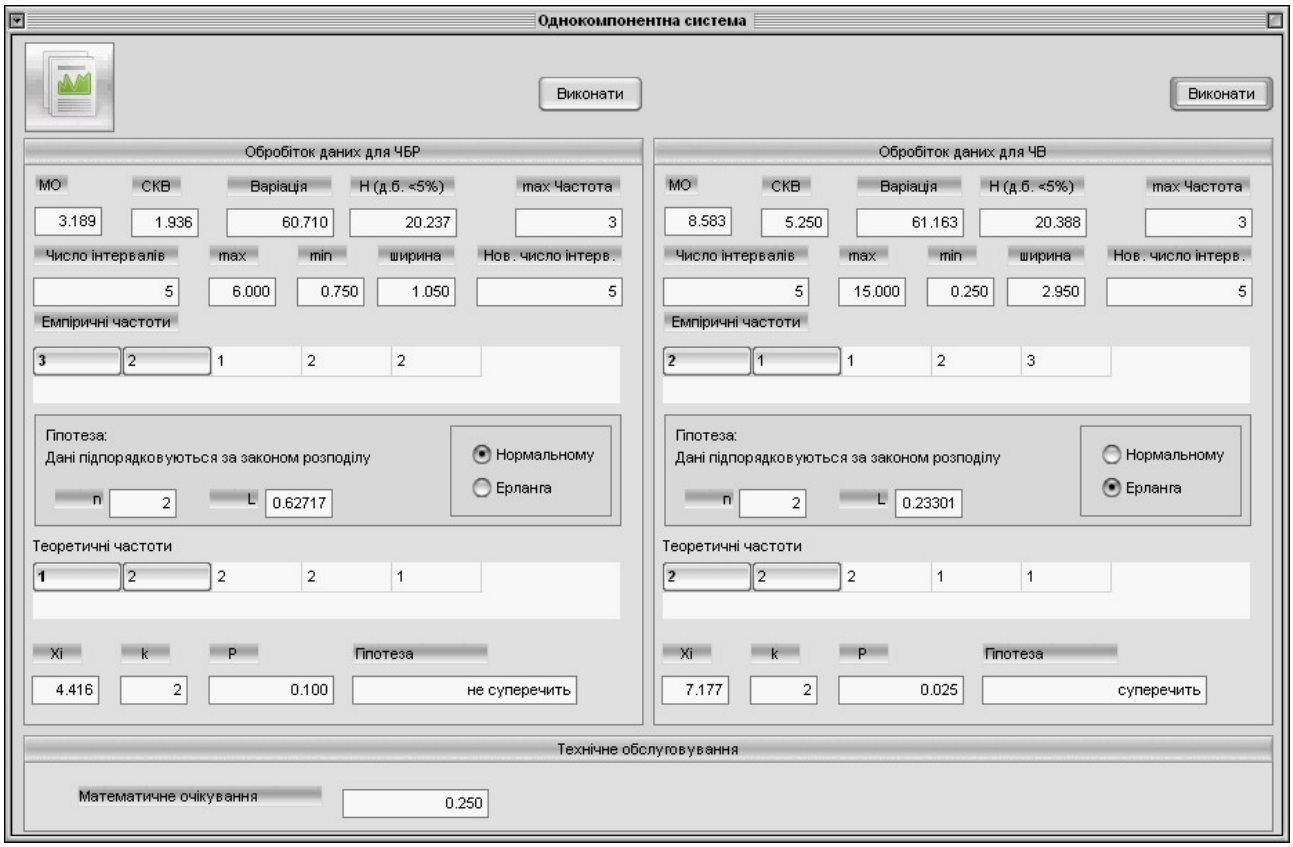


Рис. 5.8. Модуль обробітку даних і гіпотез

Для ефективного використання системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт при створенні програми для кінцевого користувача розроблена керуюча підпрограма (рис. 5.9), що містить загальне меню (всі вкладки) функцій і має засоби допомоги (довідкову систему).

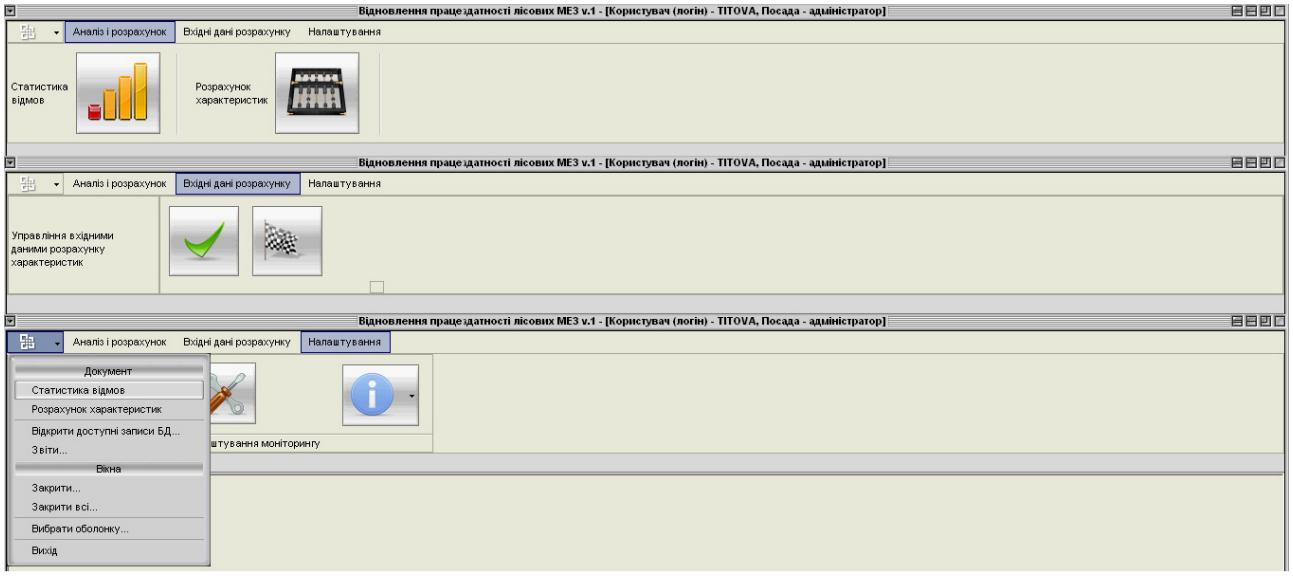


Рис. 5.9. Можливі варіанти меню «ForestMashinery»

Для організації багатовіконного інтерфейсу і забезпечення взаємодії програмних модулів засобами *Delphi* XE7 було створено основне вікно, яке включає в себе збір та обробку статистичних даних, вибір структури віднолення працездатності машин для лісотехнічних робіт, введення параметрів і вивід отриманих результатів.

Загалом меню складається із трьох напрямків управління програмою: аналізу і розрахунку, введеня вхідних даних та вкладка налаштувань. Головне меню програми дає додатково можливості роботи з базою даних, в якій зберігаються варіанти розрахунків та результати.

Головна форма АСПР дозволяє активувати одну з двох (multiple-document interface, MDI) сторінок: «Статистика відмов» або «Розрахунок характеристик».

Сторінка «Статистика відмов» дозволяє здійснити збір статистичних даних (рис. 5.7). Для цього вводиться час настання відмови і час його усунення та автоматично визначає тривалість безвідмовної роботи і тривалість ремонту і ТО та зберігає ці дані; фіксується також кількість відмов. У будь-який момент можна провести обробку даних, тобто визначити основні статистичні показники, в тому числі середнє вибіркове, вибіркову дисперсію, а також визначити закон розподілу.

Сторінка «Розрахунок характеристик» (рис. 5.7) включає в себе різні стратегії: з напрацювання, календарну і з миттєво поповнюваним резервом часу. Для кожної стратегії організовано введення вихідних даних і виведення результатів розрахунків. Вихідні дані можуть бути статистичними або вводитися з клавіатури. Ними є середні часи безвідмовної роботи, відновлення і тривалості, а також закони розподілу зазначених характеристик. Вихідні дані – оптимальна періодичність відновлення працездатності і відповідний максимальний коефіцієнт готовності системи, максимальний середній прибуток і мінімальні середні витрати.

Після введення вихідних даних, після натискання кнопки «Розрахунок», програма запускає модуль виконання розрахунків, який обчислює зазначені характеристики відповідно до обраної користувачем стратегією і вихідними

даними. Безпосередньо перед тим, як приступити до обчислювальної роботи, підсистема запитує у користувача дані про функції розподілу часів безвідмовної роботи і відновлення елементів об’єкта.

Після виконання розрахунків графічне представлення розрахованих характеристик, можна переглянути у вигляді графіків коефіцієнта готовності, середнього прибутку та середніх витрат після натискання відповідної кнопки. Ці графіки виводяться на екран, звідки під керуванням тієї ж підсистеми візуалізації результатів моделювання вони можуть бути виведені на друк. Зовнішній вигляд форми модуля візуалізації результатів (рис. 5.10 – рис. 5.12).

Однією із переваг є використання сучасного програмного забезпечення, організуючого взаємодію всіх модулів системи, що полегшує процес прийняття рішень при управлінні періодичністю відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт.

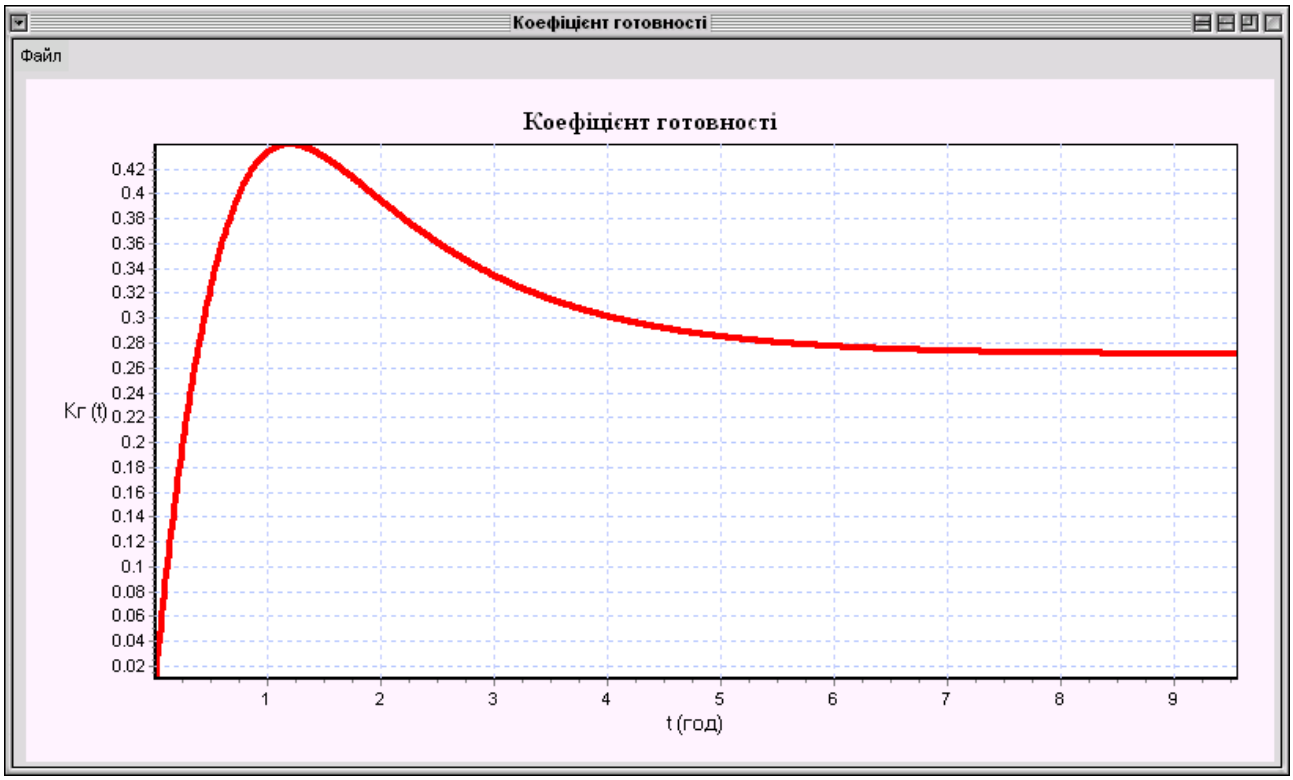


Рис. 5.10. Модуль візуалізації – коефіцієнт готовності

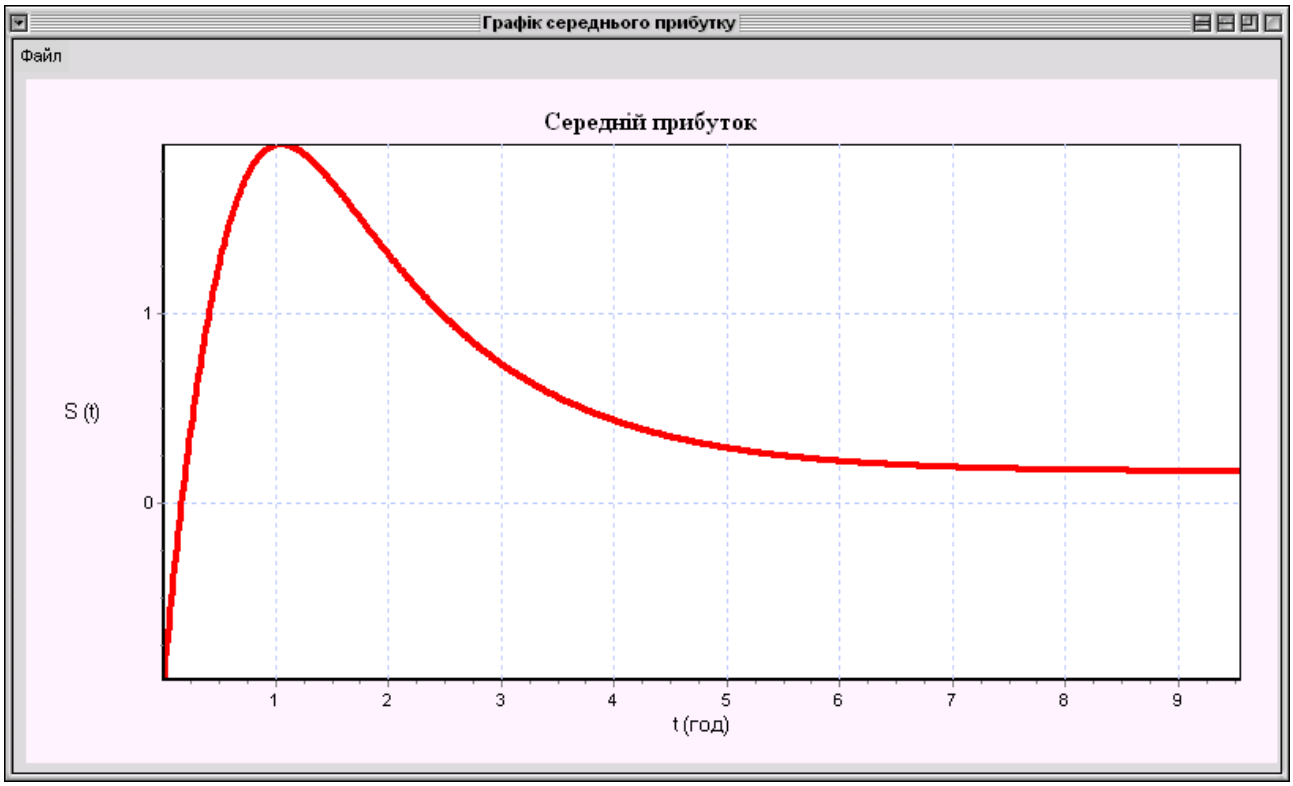


Рис. 5.11. Модуль візуалізації – середній прибуток

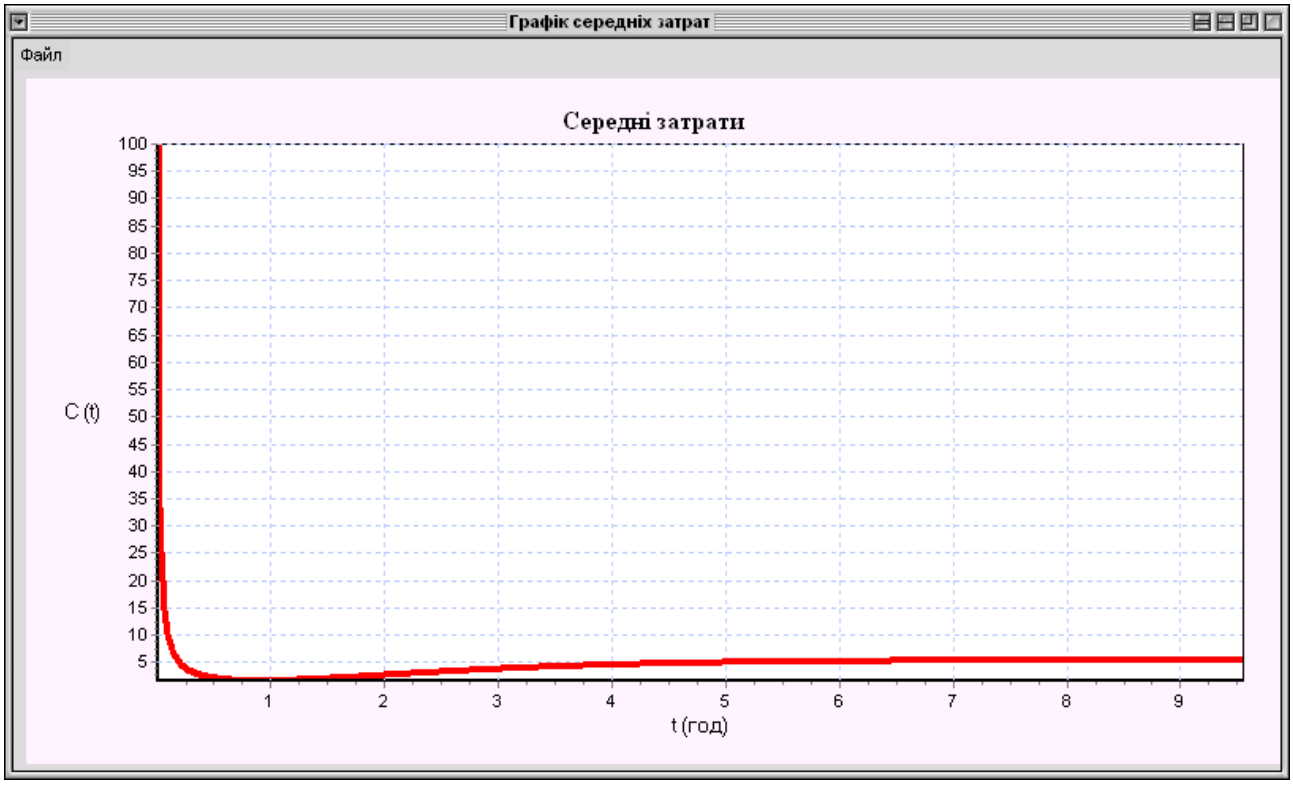


Рис. 5.12. Модуль візуалізації – середні витрати

Програмою передбачено формування звітів по проведених розрахунках. Існує два вида звітів: звіт статистичного обробітку законів розподілу часу безвідмовної роботи та звіт характеристики технічної системи відновлення праздатності машин для лісотехнічних робіт із основними показниками і графічним їх представленням.

Листинги основної програми і всіх допоміжних модулів та результати розрахунків наведені в додатку Е.

5.5. Перевірки адекватності розроблених інженерних нормативів прийняття рішень при обґрунтуванні періодичності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт

З метою перевірки адекватності розроблених математичних моделей у виробничих умовах відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт розглянуто процес функціонування лісопромислового циклу із залученням машин для лісотехнічних робіт.

При більш детальному вивченні експлуатації машин для лісотехнічних робіт були виявлені найбільш характерні відмови, які можна розділити на відмови двигуна, паливної апаратури, трансмісії, ходової частини і по робочим органам.

Найбільш часті відмови машин для лісотехнічних робіт, які спостерігались за робочими органами, були виявлені у виді: затуплення ріжучих частин фрезерних ножів; поломка робочої частини щелеп і затуплення ріжучих кромок пил; розбиття посадочних отворів під підшипники, затуплення ріжучих крайок ножів та їх викришування. Ці види відмов спостерігалися до 2–3 разів на зміну.

В експерименті досліджувалася профілактична заміна: паливних форсунок, підшипника керованого колеса і манжети гідророзподільника. В тривалість ТО включена заміна деталі та його регулювання. За технологічним процесом профілактична заміна деталей має періодичність 4 години. В експерименті машина для лісотехнічних робіт розглядався як однокомпонентна система.

Програма та методика експериментального дослідження згідно ДСТУ 3004. Виробничий експеримент складався з двох частин. Перша полягала у визначенні закону розподілу напрацювання на відмову і часу відновлення машини для лісотехнічних робіт, друга – в перевірці адекватності стохастичних моделей.

Дані хронометражу першого експерименту по часу напрацювання на відмову, часу відновлення узагальнені і зведені в таблицю Р.1 (додаток Р). Статистична обробка результатів експерименту представлена в табл. Р.2, Р.3 і Р.4. Напрацювання на відмову підпорядковується спеціальному закону Ерланга 6-го порядку, а час відновлення – спеціальному закону Ерланга 4-го порядку. Розрахована основна характеристика надійності – коефіцієнт готовності $K_Г$ = 0,851.

На рис. Р.1 (додаток Р) показаний вид теоретичної та емпіричної щільності розподілу часу безвідмовної роботи (ЧБР) машини для лісотехнічних робіт без ТО. Перевірка за критерієм Пірсона показала, що $P(\chi^2)$=0,15, отже, теоретична апроксимуюча залежність підібрана правильно і не суперечить експериментальним даним. Аналогічні криві для густин розподілу часу відновлення (ЧВ) зображені на рис. Р.2; для них визначено значення $P(\chi^2)$= 0,15, що також підтверджує правомірність апроксимації і не суперечить експериментальним даним (табл. Р.4).

Дані хронометражу другого експерименту за часом напрацювання на відмову, часу відновлення і ТО узагальнені і зведені в табл. Р.5 і Р.6. Статистична обробка результатів експерименту представлена в табл. Р.7, Р.8 і Р.9. Розрахована основна характеристика надійності – коефіцієнт готовності $K_Г$ = 0,867.

На рис. Р.3 показаний вид теоретичної та емпіричної щільності розподілу ЧБР машин для лісотехнічних робіт з ТО. Перевірка за критерієм Пірсона показала, що $P(\chi^2)$= 0,15, отже, теоретична апроксимуюча залежність підібрана правильно і не суперечить експериментальним даним. Аналогічні криві для

густин розподілу часу відновлення зображені на рис. Р.4; для них визначено значення $P(\chi^2)$= 0,15, що також підтверджує правомірність апроксимації і не суперечить експериментальним даним (табл. Р.9).

Ґрунтуючись на результатах експерименту – середніх ЧБР, ЧВ, часу профілактичної заміни інструменту і теоретичних законах розподілу цих параметрів, за допомогою моделі (2.19) був розрахований коефіцієнт готовності, який склав $K_Г$ = 0,912.

Порівняння розрахункових і експериментальних даних по надійності ТК (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Результати досліджень пасивного експерименту

Система	Експеримент	ПМ модель	Похибка
	$K_Г$	$K_Г$ (τ = 4 год)	
Однокомпонентна	0,867	0,912	4,8%

З таблиці видно, що розрахункові результати відрізняються від експериментальних по $K_Г$ не більше ніж на 5%, що підтверджує достатній ступінь адекватності моделей відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт з урахуванням стратегій, розроблених в розділі 2.

5.6. Прийняття інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей

Можливості системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт при ухваленні інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей приймається інженером-механіком на основі його досвіду і кваліфікації, що не сприяло значному підвищенню надійності машин для лісотехнічних робіт.

У цих умовах нами запропонована блочність (рис. 5.13), яка дозволяє запровадити процес прийняття рішення на основі кількісних оцінок технічних і

економічних показників функціонування машин для лісотехнічних робіт у виробничому лісопромисловому циклі.

Функціонування інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей може бути організовано в різній послідовності:

- оптимізація періодичності ТО на основі зібраних вихідних даних про відмови деталей і їх статистичної обробки;

- оптимізація періодичності ТО за наявності у оператора готових статистичних даних про характеристики лісових МЕЗ.

Для інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей робота системи організована за варіантом статистичних даних через виробничий експеримент реального лісопромислового циклу.

При відсутності системності інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей, прийняття рішення обумовлено інтуїтивно і становила 4 години. Коефіцієнт готовності при цьому $K_Г$ = 0,912.

Наведена залежність коефіцієнта готовності від періодичності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт (рис. 5.14) для вихідних даних, взятих з виробничого експерименту, дозволяє стверджувати, що періодичність τ= 4 години, не є оптимальною.

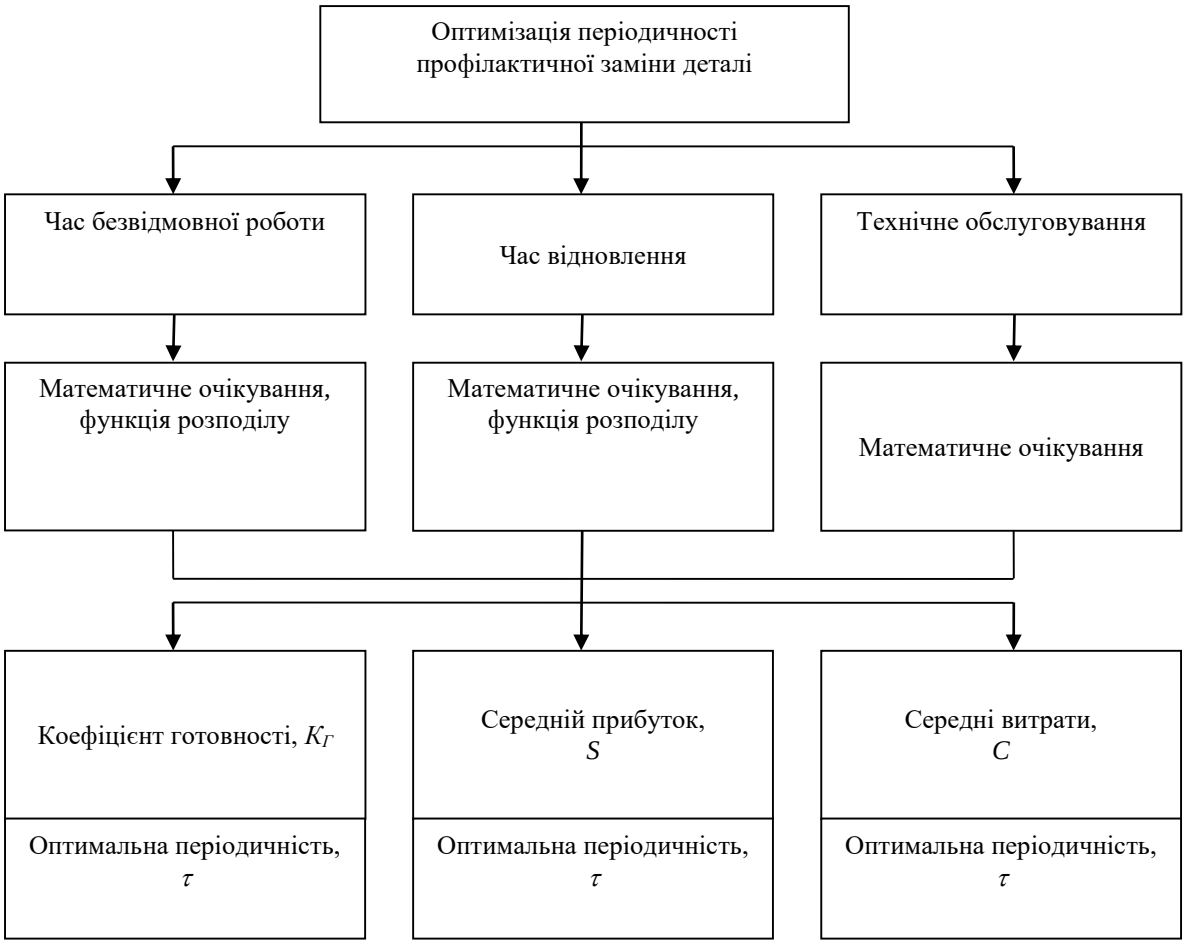


Рис. 5.13. Блочність прийняття рішення періодичності профілактичної заміни деталі

Перевірка даного результату за допомогою системності показала, що оптимальна періодичність $\tau_{опт}$ = 2 год 45 хв і відповідний коефіцієнт готовності $K_Г$ = 0,923. Це дало можливість зробити рекомендації щодо удосконалення інженерних заходів: при цьому має скоротитися на 22% час відмов і підвищитися коефіцієнт готовності машин для лісотехнічних робіт на 1,2%. Використання цих рекомендацій у виробничих умовах сприяло підвищення коефіцієнта готовності машин для лісотехнічних робіт на 2%.

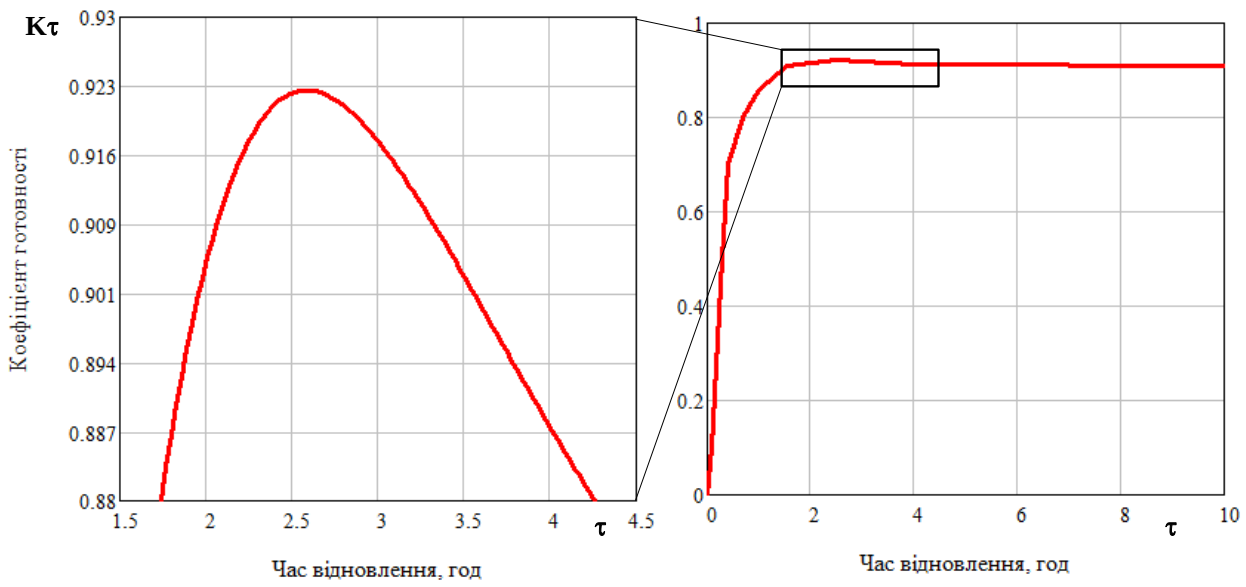


Рис. 5.14. Графік залежності коефіцієнта готовності від періодичності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт для вихідних даних виробничого експерименту

Рішення про оптимальну періодичність профілактичної заміни детлі може прийматися не тільки по технічному показнику якості функціонування машин для лісотехнічних робіт – коефіцієнту готовності $K_Г$, але й з економічних: середнього прибутку і середнім витратам, що визначається виробничою необхідністю.

5.7. Висновки з розділу

Обгрунтовано системність прийняття рішень при управлінні періодичністю відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт з використанням авторського прикладного програмного забезпечення.

Встановлено емпіричні закони розподілу деяких характеристик надійності лісових за даними виробничого експерименту: напрацювання на відмову підпорядковується спеціальному закону Ерланга 6-го порядку, а час відновлення – спеціальному закону Ерланга 4-го порядку.

На основі експериментальних хронометражних даних, зібраних у виробничих умовах ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група»,

проведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів моделей за коефіцієнтом готовності, яке підтвердило адекватність запропонованих математичних моделей за розбіжності результатів, що не перевищує 5%.

Експериментально підтверджено доцільно використання системності прийняття інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей, що дозволили скоротити на 22% наробіток на відмову і підвищити коефіцієнт готовності на 2% машин для лісотехнічних робіт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу роботи лісогосподарської техніки встановлено, що надійність енергетичної установки машини для лісотехнічних робіт (безвідмовність) найнижча в порівнянні з іншими його агрегатами. Одним з основних вузлів, від технічного стану якого залежить залишковий ресурс, є циліндро-поршнева група.
2. Встановлено, що одним з факторів підвищення надійності двигуна є впровадження перспективних методів діагностування і прогнозування технічного стану, одним з яких є віброакустичний, що базується на фазі виникнення вібраційного відгуку.
3. Теоретичний аналіз та експериментальні дослідження показали, що з підвищенням зазору в ЦПГ пропорційно зростає фаза виникнення віброакустичного посилання по відношенню до опорної точки від 7,67-16,14° п.к.в. при 750 хв$^{-1}$ до 5,24-10,47° п.к.в. при 2000 хв$^{-1}$ для зміни зазору відповідно від 0,22 до 0,82 мм. Оптимальним режимом діагностування є частота обертання колінчастого валу рівна 1000 хв$^{-1}$. Визначення функціональної залежності фази виникнення віброакустичного посилання при перекладці поршня від зазору в спряженні “поршень-гільза” забезпечує розроблена математична модель, реалізована у вигляді програми на ПЕОМ.
4. Встановлено, що для підвищення точності діагностування ЦПГ доцільно використовувати ультразвуковий діапазон частот. В результаті дослідження тривалості співудару поршня об гільзу та вибору моделі віброакустичного імпульсу, визначена ширина його спектру, яка знаходиться в діапазоні до 100 кГц.
5. Обґрунтовані параметри роботи алгоритму діагностування, що забезпечують мінімум помилок першого (α=0,007) і другого (β=0,02) видів, визначених за допомогою комп’ютерної програми прийняття рішення про технічний стан ЦПГ, яка базується на основі адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів: Байеса; максимальної правдоподібності та зрізаного.

6. Розроблені математичні моделі індивідуального прогнозування залишкового ресурсу енергетичної установки машини для лісотехнічних робіт, які базуються на теоретичних і експериментальних дослідженнях, дозволяють визначати його без додаткових затрат на ТОР.
7. Запропонований метод може бути покладений в основу створення єдиної системи аналізу роботоздатності рядного дизельного двигуна, а розроблений прилад для віброударного діагностування ЦПГ в ультразвуковому частотному діапазоні на частоті близько 70 кГц і може використовуватись як засіб постійного моніторингу двигуна машини для лісотехнічних робіт.
8. За результатами господарської перевірки досліджень отримано економічний ефект у МДП “Агротехінформсервіс” у розмірі 152 ум. од. на кожен двигун. В цілому результати досліджень дозволяють вирішувати на принципово новій теоретичній основі практичні задачі діагностування ЦПГ, визначення і прогнозування залишкового ресурсу енергетичної установки машини для лісотехнічних робіт і можуть бути покладені в основу створення системи оцінки роботоздатності будь-якого рядного дизельного двигуна машин для лісотехнічних робіт.
9. Встановлено емпіричні закони розподілу деяких характеристик надійності лісових за даними виробничого експерименту: напрацювання на відмову підпорядковується спеціальному закону Ерланга 6-го порядку, а час відновлення – спеціальному закону Ерланга 4-го порядку.
10. На основі експериментальних хронометражних даних, зібраних у виробничих умовах ДП Лугинське ТОВ «Європейська лісопереробна група», проведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів моделей за коефіцієнтом готовності, яке підтвердило адекватність запропонованих математичних моделей за розбіжності результатів, що не перевищує 5%.
11. Експериментально підтверджено доцільно використання системності прийняття інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної

заміни деталей, що дозволили скоротити на 22% наробіток на відмову і підвищити коефіцієнт готовності на 2% машин для лісотехнічних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державна цільова програма "Ліси України" на 2010-2015 роки. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 16 вересня 2009 р. № 977. – К., 2009. – 35 с.

2. Жулан О. Ю. Раціональний підхід до організації стратегії технічного обслуговування і ремонту дизелів / О. Ю. Жулан // Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування деревообробних підприємств. – 2009. – Вип. 19.10. – С. 94–98.

3. Войцеховська Ю. В. Інноваційні аспекти оновлення технологічного обладнання виробничих систем / Ю. В. Войцеховська, А. О. Мавріна, Г. Р. Копець // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.5. – С. 340–345.

4. Кіндрацький Б. І. Раціональне проектування машинобудівельних конструкцій : монографія / Б. І. Кіндрацький, Г. Т. Сулим. – Львів : Вид-во КІНТАПРІ ЛТД, 2003. – 280 с.

5. Taylor J. C. A statistical theory of depreciation / Taylor J. C. // The Journal of the American statistical Association, December, 2013. – P. 66–74.

6. Dethoor J. M. Lavie des eqnipements investissement. Renonvelloment Maintonence / J. M. Dethoor. – Paris : Duhod, 2008. – P. 23–27.

7. Hwang C. L. Multiple Objective Decision Making / C. L Hwang, A. Masud // Methods and Applications : A State of the Art Survey", Lecture Notes in Economics and Mathematical Sistema No, 164, Springer-Verlag, New York, 2009. – P. 101–103.

8. Derman C. Replfcement of Periodically Inspected Equipment / C. Derman, Y. Sask // Naval Res. Logist Qnart. 2010. – № 4. – P. 75–83.

9. Fogel A. Die modernen Technologien im Maschinenba / A. Fogel. – Berlin, 2006 – 304 p.

10. Максимів В. М. Моделювання процесів функціонування автоматизованих ліній деревообробки : монографія / В. М. Максимів. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ, 1997. – 184 с.

11. Яковлев К. А. Концептуальные основы развития ситуационного подхода в системах управления парком транспортно-технологических машин / К. А. Яковлев // РЕГИОН : системы, экономика, управление. – 2011. – №3(14). – С. 125–130.

12. Собко Н. М. Дослідження основних показників роботи лісозаготівельної техніки в гірських умовах / Н. М. Собко // Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування деревообробних підприємств. – 2012. – Вип. 22.8. – С. 121–126.

13. Правила рубань в гірських лісах Українських Карпат. – К. : Держком. лісового господарства, 2003. – 24 с.

14. Мурашкин Н. В. Экономика и менеджмент лесозаготовительного предприятия / Н. В. Мурашкин, Э. М. Гусейнов. – СПб. : Изд-во гос. Университета, 2007. – 963 с.

15. Мартинців М. П. Аналіз роботи та принцип формування структури проектування машин для освоєння гірських лісів / М. П. Мартинців, Й. С. Бадера, О. Т. Ковальчик // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук. - техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2006. – Вип. 16.5. – С. 59–62.

16. Мартинців М. П. Особливості моделювання виробничих процесів лісозаготівель у гірських умовах методом граф / М. П. Мартинців, Й. С. Бадера, Г. А. Матвєєва, О. Т. Ковальчук // Науковий вісник НЛТУ України : Лісоексплуатація. – 2006. – Вип. 16.3. – С. 59–63.

17. Кійко О. А. Економіко-математична модель функціонування лісового сектора України / О. А. Кійко, І. О. Кійко // Науковий вісник НЛТУ України : Інформаційні технології галузі. – 2012. – Вип. 22.2. – С. 349–357.

18. Кравченко В. М. Техническое обслуживание и диагностика промышленного оборудования / В. М. Кравченко. – М : Ассо, 2005. – 504 с.

19. Ізонін І. В. Проблематика задач стохастичного моделювання в управлінні виробничими запасами / І. В. Ізонін, Т. Я. Лагоцький // Науковий вісник НЛТУ України : Інформаційні технології галузі. – 2012. – Вип. 22.5. – С. 351–356.

20. Заикин А. Н. Варианты прогнозирования продолжительности расчетного периода при моделировании работы лесосечных машин / А. Н. Заикин, В. М. Меркелов, Е. Г. Рыжикова, И. И. Теремкова // Вестник КрасГАУ. – 2013. – №10 (85) – С. 191–196.

21. Лебедев В. Д. Повышение долговечности деталей лесозаготовительных машин газопламенным напылением при ремонте : дисс. … кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хазяйства» / Лебедев Владимир Дмитрович ; ЛТА, – Л., 1989. – 196 с.

22. Мурашкин Н. В. Методы оценки технологий, систем машин и форм организации лесозаготовок / Н. В. Мурашкин, Н. Э. Гусейнова, Э. М. Гусейнов, О. Н. Тюкина. – СПб. : СПбГУ, 2008. – 108 с.

23. Немцов В. П. Справочник механика лесозаготовительного предприятия / В. П. Немцов, Б. А. Шестаков. – М. : Лесная промышленность, 1988. – 480 с.

24. Селиванов К. В. Повышение эффективности эксплуатации лесозаготовительных машин путем совершенствования диагностирования дизельной топливной аппаратуры. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Селиванов Кирилл Владимирович ; ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса». – М., 2013. – 17 с.

25. Тимочко В. О. Ефективні виробничі структури дільниць поточного ремонту тракторів класів 1,4 і 0,9 (на прикладі ремонтних майстерень господарств заходу України) : дисс. … кандидата технических наук : 05.20.03 «Технології і засоби технічного обслуговування в сільському господарстві» / Василь Олегович Тимочко ; Львівський сільськогосподарський інститут. – Дубляни, 1994 – 244 с.

26. Шкіря Т. М. Технологія і машини лісосічних робіт / Т. М. Шкіря. – Львів : Вид-во "Тріада – плюс", 2003. – 352 с.

27. Юшков А. Н. Повышение эффективности работы гидропривода лесных машин путем совершенствования технического обслуживания и ремонта. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Юшков Александр Николаевич ; ГОУ ВПО Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия. – СПб., 2013. – 20 с.

28. Холопов В. Н. Повышение эксплуатационных свойств лесных машин для горных условий : дис. … доктора технических наук : 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Владимир Николаевич Холопов. – Красноярск, 2003. – 315 с.

29. Тетерина М. А. Обоснование параметров обрабатывающе-транспортной системы «харвестер – форвардер». : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Тетерина Мария Александровна ; ГОУ ВПО «Марийский государственный технический университет». – М., 2009. – 22 с.

30. Новопашин Л. А. Исследование пусковых свойств дизелей лесотранспортных машин при отрицательных температурах. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Л. А. Новопашин. – Екатеринбург, 2006. – 23 с.

31. Павлов А. И. Повышение надежности гидроприводов лесных машин. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Александр Иванович Павлов. – Йошкар-Ола, 2004. – 23 с.

32. Матросов А. В. Обоснование системы лесосечных машин для сортиментного метода лесозаготовок. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Матросов Алексей Васильевич ; ГОУ ВПО «Московский государственный университет леса». – М., 2008. – 21 с.

33. Ложник Д. В. Обоснование оптимальных схем лесотранспортного процесса лесопромышленных машин. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Ложник Дмитрий Викторович ; Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова. – СПб., 2013. – 24 с.

34. Кяльвияйнен В. А. Оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Кяльвияйнен Вейкко Армасович ; Петрозаводский государственный университет. – Петразаводск, 2013. – 24 с.

35. Кирюхина О. И. Формирование управления системы ремонтным обслуживанием лесопромышленных предприятий. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата экономических наук : спец. 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами – промышленность) / Кирюхина Ольга Игоревна ; Брянская государственная инженерно-технологическая академия. – СПб., 2011. – 20 с.

36. Карпов А. С. Повышение эксплуатационных характеристик двигателей лесовозных автомобилей. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Александр Семенович Карпов. – Воронеж, 2000. – 22 с.

37. Ильин А. В. Совершенствование конструктивных параметров гидростатической трансмиссии для колесных лесных машин : дис. … кандидата технических наук / Ильин Александр Васильевич. – Екатеринбург. 2005. – 123 с.

38. Дац Ф. А. Совершенствование технической эксплуатации зарубежных лесозаготовительных машин. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины

лесозаготовок и лесного хозяйства» / Дац Фёдор Анатольевич ; ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса». – М., 2011. – 19 с.

39. Голубев М. И. Повышение эффективности хранения лесохозяйственных машин путем разработки и применения ресурсосберегающих консервационных составов. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Голубев Михаил Иванович ; ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса». – М., 2013. – 16 с.

40. Барашков И. А. Повышение эффективности эксплуатации колесных лесозаготовительных машин на переувлажненных почвогрунтах. : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Барашков Игорь Александрович ; Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова. – СПб., 2013. – 20 с.

41. Бабичева О. Ф. Повышение ресурса пневматических шин транспортных средств : дисс. … кандидата технических наук : 05.22.20 «Эксплуатация та ремонт средств транспорта»/ Ольга Фёдоровна Бабичева // Харьковская национальная академия городского хазяйства. – Х., 2005 – 202 с.

42. Анисимов Г. М. Исследование влияния процесса трелевки древесины и условий эксплуатации на нагруженность трансмиссий трелевочного трактора при работе на лесозаготовках : дисс. … доктора технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хазяйства» / Анисимов Георгий Михайлович ; ЛТА. – Л., 1973. – 371 с.

43. Воскобойников И. В. Техническое обслуживание и ремонт лесозаготовительных машин и оборудования / И. В. Воскобойников, С. И. Рузин. – М. : Лесная промышленность, 2004. – 280 с.

44. Котиков В. М. Лесозаготовительные и трелёвочные машины / В. М. Котиков, С. Н. Еремеев, А. В. Ерхов // под ред. В. М. Котикова. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.

45. Лютий Є. М. Елементи теорії технічних систем / Є. М. Лютий, М. П. Мартинців, Л. О. Тисовський. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ, 2003. – 181 с.

46. Собко Н. М. Оцінка роботи системи машин на лісозаготівлях у гірських умовах на основі комплексних показників / Н. М. Собко // Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування деревообробних підприємств. – 2011. – Вип. 21.8 – С. 136–145.

47. Кушнарев Л. И. Совершенствование технического сервиса машино-тракторного парка МТС : монография / Л. И. Кушнарев. – М. : МГАУ, 2002. – 135 с.

48. Драгунович В. И. Ремонт машин и механизмов в лесной промышленности / В. И. Драгунович, В. С. Гончаров. – М. : 2-е изд., перераб. и доп. ; Лесная промышленность, 1986. – 296 с.

49. Костяев В. Н. Выбор транспортной сети для освоения лесосырьевых баз. : дисс. … канд. техн. наук : 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Костяев Владимир Николаевич. – М., 2014. – 180 с.

50. Быков В. В Технический сервис. Система технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной и лесохозяйственной техники / В. В. Быков, Г. И. Голубев, В. И. Игнатов, и др. – М. : МГУЛ, 1999. – 128 с.

51. Кусакин Н. Ф. Устройство и эксплуатация трелевочных тракторов / Н. Ф. Кусакин. – М. Лесная промышленность, 1985. – 272 с.

52. Яковлев К. А. Определение оптимальной структуры состава парка лесотехнической техники / К. А. Яковлев, А. В. Муратов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – №1. – С. 43–46.

53. Воскобойников И. В. Техническое диагностирование лесозаготовительных машин / И. В. Воскобойников. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 192 с.

54. Герис М. І. Структурна схема математичної моделі керованого руху та оптимізації параметрів колісних лісотранспортних машин / М. І. Герис // Науковий вісник НЛТУ України : Лісоексплуатація. – 2012. – Вип. 22.13. – С. 118–122.

55. Мартинців М. П. Розроблення методу формування альтернативних варіантів системи машин для лісозаготівель / М. П. Мартинців, Т. З. Матюхіна // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук. -техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2007. – Вип. 17.7. – С. 120–123.

56. Полетайкин В. Ф. Проектирование специальных лесных машин / В. Ф. Полетайкин. – Красноярск. : Сиб. гос. технол. ун-т, 2007. – 280 с.

57. Рузин С. И. Справочник слесаря-ремонтника леспромхоза / С. И. Рузин. – М. : – 2-е изд., перераб. и доп. ; Лесная промышленность, 2009. – 288 с.

58. Быков В. В. Устройство, ремонт и наладка лесозаготовительного оборудования / В. В. Быков, В. С. Найман. – М. : Экология, 1991. – 384 с.

59. Яковлев К. А. Оптимизация параметров управления состоянием элементов лесозаготовительных машин [Электронный ресурс] / К. А. Яковлев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – Режим доступа : www.science-education.ru/103–6422.

60. Жиркин Ю. В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин / Ю. В. Жиркин // МГТУ им. Г.И. Носова, – 2005. – 504 с.

61. Куликов В. Н. Техническое обслуживание лесозаготовительных машин / В. Н. Куликов, В. П. Копчиков. – М. : Лесная промышленность, 1981. – 80 с.

62. Ледовников В. А. Надежность подвижных сопряжений машин / В. А. Ледовников. – М., 1993. – 223 с.

63. Яковлев К. А. Комплекс транспортно-технологических машин в лесном хозяйстве региона: проблемы управления жизненным циклом / К. А. Яковлев // Регион: системы, экономика, управление. – 2011. – №3(14). – С. 116–124.

64. Андреев В. Н. Обоснование нормативов надежности машин лесного комплекса / В. Н. Андреев, В. С. Кралин // Лесная промышленность. – 1984. – №7. – С. 27.

65. Яковлев К. А. Решение задачи многоцелевой оптимизации подвижности лесотехнических машин / К. А. Яковлев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т.6. – №7. – С. 64–67.

66. Рекомендации по текущему ремонту агрегатов гидропривода лесозаготовительных машин. – Химки : ВНПОлеспром, ЦНИИМЭ, 1990. – 100 с.

67. Курчаткин В. В. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин. – М. : Колос, 2000. – 775 с.

68. Задиран А. М. Текущий ремонт лесозаготовительных машин / А. М. Задиран, Ю. М. Кулагин, Е. К. Панов. – М. : Лесная промышленность, 1988. – 144 с.

69. Ерахтин Д. Д. Гидросистемы лесозаготовительных машин (эксплуатация и ремонт) / Д. Д. Ерахтин, Ю. И. Багин. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 200 с.

70. Драгунович В. И. Ремонт машин и оборудования лесозаготовительных предприятий / В. И. Драгунович, И. Н. Бабушкин. – М. : Лесная промышленность, 1982. – 296 с.

71. Горбачевский В. А. Эксплуатация машин и механизмов на лесозаготовках / В. А. Горбачевский. – М., : Лесная промышленность, 1980. – 296 с.

72. Быков В. В. Устройство, ремонт и наладка лесозаготовительного оборудования / В. В. Быков, В. С. Найман. – М. : Экология, 1993. – 204 с.

73. Прохоров В. Б. Эксплуатация машин в лесозаготовительной промышленности / В. Б. Прохоров. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 304 с.

74. Коржов В. Л. Современные тенденции машинизации лесозаготовок /В. Л. Коржов // Деревообработка, оборудование и инструмент. – 2008. – №1. – С. 68–70.

75. Тіунчик В. К. Перспективи вдосконалення тракторів / В. К. Тіунчик, В. В. Лентяков // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.2. – С. 56–57.

76. Гилев А. В. Ремонт машин и оборудования / А. В. Гилёв, Л. В. Хомич. – Красноярск. : Изд-во Красноярского гос. ун-та, 2006. – 36 с.

77. Марущак Я. Ю. Порівняльний аналіз статистичних методів діагностування механічних систем / Я. Ю. Марущак // Науковий вісник НЛТУ України : Інформаційні технології галузі. – 2009. – Вип. 19.7. – С. 249–253.

78. Яковлев К. А. Диспетчерское управление и контроль транспортных средств как важнейшее инновационное направление / К. А. Яковлев // Научно-практический вестник : «Энергия XXI век». – 2009. – № 2 (72). – С. 53–57.

79. Веденеев А. Г. Справочник по техническому обслуживанию и ремонту лесозаготовительных машин и оборудования / А. Г. Веденеев, И. В. Воскобойников, С. И. Рузин. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 320 с.

80. Полоз В. І. Оптимальна періодичність технічного обслуговування та ремонту обладнання для подрібнення деревини / В. І. Полоз, В. В. Шостак / Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування деревообробних підприємств. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 156–161.

81. Яковлев К. А. К вопросу эффективности решения многокритериальных задач управления машинами лесного комплекса / К. А. Яковлев // Научно-технический вестник. Поволжья. – 2010. – №1. – С. 175–180.

82. Веденеев А. Г. Справочник по техническому обслуживанию и ремонту лесозаготовительных машин и оборудования / А. Г. Веденеев, И. В. Воскобойников, С. И. Рузин. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 320 с.

83. Zol D. Forest machine / Zol D. // USA, 2002. – 339 p.

84. Александровская Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М. : Логос, 2001 – 208 с.

85. Багин Ю. И. Гидросистемы лесозаготовительных машин / Ю. И. Багин, Д. Д. Ерахтин. – М. : – 2-е изд., перераб. и доп. : Лесная промышленность, 1983. – 232 с.

86. Быков В. В. Концептуальные и технологические основы системы технического сервиса транспортных и технологических машин лесного комплекса : монография / В. В. Быков. – М. : МГУЛ., 2004. – 324 с.

87. Курбатов М. П. Исследование нагрузочных режимов работы транспортных агрегатов с энергонасыщенными тракторами. : автореф. дисс. на на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Максим Петрович Курбатов. – Ленинград – Пушкин, 1982. – 19 с.

88. Стиранівський О. А. Типаж і головні параметри перспективних колісних лісотранспортних машин / О. А. Стиранівський, Н. І. Библюк, М. М. Борис, М. І. Герис // Науковий вісник НЛТУ України : Лісоексплуатація. – 2006. – Вип. 16.6. – С. 62–69.

89. Седуш В. Я. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий / В. Я. Седуш, В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская. – М. : Ассо, 2004. – 100 с.

90. Плахтин В. Д. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования / В. Д. Плахтин. – М. : Металлургия, 1991. – 415 с.

91. Приходько Р. А. Стохастические модели календарного технического обслуживания производственных систем : дисс. … кандидата технических наук : 01.05.02 «Математическое моделирование и вычислительные методы» / Роман Александрович Приходько // Национальная металлургическая академия Украины. – Донецк, 2006. – 175 с.

92. Быков В. В. Технологические расчеты при проектировании процессов восстановления и упрочнения деталей машин лесного комплекса / В. В. Быков, Г. Ф. Дружков, И. В. Воскобойников. – М. : МЛТИ, 1990. – 118 с.

93. Варава В. И. Основы динамики машин / В. И. Варава. – СПб. : СПбГЛТА, 2007. – 72 с.

94. Зайцев Г. Н. Нормирование точности геометрических параметров машин / Г. Н. Зайцев. – М : Academia, 2008 – 368 с.

95. Васильєва О. Е. Аналіз сучасних методів прогнозування надійності пожежних автомобілів з метою удосконалення процесу їх технічного

обслуговування / О. Е. Васильєва, В. В. Палканинець // Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування лісовиробничого комплексу. – 2013. – Вип. 23.15. – С. 119–126.

96. Дудюк Д. Л. Елементи теорії автоматичних ліній / Д. Л. Дудюк, Л. Д. Загвойська, В. М. Максимів, Л. М. Сорока : – Київ – Львів : Вид-во ІЗМН. 1998 р. – 192 с.

97. Кадильникова Т. М. Научно-методологические основы обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик машин на базе мониторинговых систем многопараметрического диагностирования : дисс. … доктора технических наук : 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» / Татьяна Михайловна Кадильникова // Национальная металлургическая академия Украины. – Донецк, 2008. – 439 с.

98. Палагута В. И. Совершенствование системы технического обслуживания гидроприводов сельськохозяйственного трактора : дисс. … кандидата технических наук : 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Валерий Иванович Палагута // Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства. – Х., 1999. – 158 с.

99. Крохта Г. М. Повышение эффективности эксплуатации энергонасыщенных тракторов в условиях Западной Сибири. : автореф. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Григорий Михайлович Крохта. – Новосибирск, 1995. – 33 с.

100. Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия / Ю. Д. Гамбург. – М : Техносфера, 2006 – 216 с.

101. Положение о централизованном восстановлении деталей лесозаготовительных машин и оборудования. – Химки : ВНПОлеспром : ЦНИИМЭ, 1990. – 63 с.

102. Дзюбан А. М. Исследование режимов технического обслуживания автомобильных поездов. – К. 1975. – 225 с.

103. Багин Ю. И. Гидросистемы лесозаготовительных машин / Ю. И. Багин, Д. Д. Ерахтин. – М. : 2-е изд., перераб. и доп. : Лесная промышленность, 1983. – 232 с.

104. Кривцун В. І. Методика обґрунтування раціональних значень параметрів технічного обслуговування інженерної техніки тривалого зберігання з урахуванням почасової надмірності та неповної інформації щодо безвідмовності : дис. … кандидата технічних наук : 20.02.14 «Озброєння та військова техніка»/ Валерій Іванович Кривцун // Військовий інженерний інститут Подільського державного аграрно-технічного університету. – Кам'янець-Подільський, 2006. – 160 с.

105. Быков В. В. Методологические и технологические основы системы технического сервиса лесных машин. : автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Быков Владимир Васильевич ; ГОУ ВПО «Московский государственный университет леса». – М., 2005. – 21 с.

106. Буклагин Д. С. Научно-методические основы оценки технического уровня сельскохозяйственной техники на базе системного анализа информации : дис. … доктора технических наук : 05.05.11 / Буклагин Дмитрий Сергеевич. – М., 1997. – 85 с.

107. Бей Р. В. Оптимизация структуры технологических процессов разборки машин : дисс. … кандидата технических наук : 05.02.08 «Технология машиностроения» / Руслан Владимирович Бей // Сумский национальный аграрный университет. – Сумы, 2002. – 174 с.

108. Ахмед З. А. Шараф Повышение надежности стареющих комплексов путем оптимизации параметров систем технической диагностики : дисс. … кандидата технических наук : 05.13.06. «Информационные технологии» / Ахмед З. А. Шараф // Нац. техн. ун-т. «Харьковский политехнический институт». – Х., 2005. – 214 с.

109. Zitter H. U. Composite materials. The directory / Zitter H. U. // Geneva., – 1999 – 100 с.

110. Балихин В. В. Восстановление элементов трансмиссий лесозаготовительных машин. : дисс. … доктора технических наук : 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Балихин Владимир Васильевич ; ЛТА. – СПб., 1988 – 371 с.

111. Jorgensen Me D. W. Optimal replacement Policy / D. W. Jorgensen Me, J. J. Call, R. Radner // Amsterdam, Nort-Holland, publ. Co, 2007. – P. 31–36.

112. Белогуров Е. А. Динамические методы диагностирования автомобиля в дорожных условиях : дисс. … кандидата технических наук : 05.22.20 «Эксплуатация та ремонт средств транспорта» / Егор Алексеевич Белогуров // Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. – Х., 2011. – 200 с.

113. Амбарцумян А. А. Логическое управление технологическими процессами на основе обратной связи по отклонению // А. А. Амбарцумян // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2001. – № 4. – С. 5–11.

114. Soland R. M. A renewal theoretic approach to the estimation of future demand for replacement pfrts / R. M. Soland // Operations Research. 2008. – Vol. 16, №1. – P. 87–98.

115. Яковлев К. А. Оптимизация показателей надежности транспортно-технологических машин (на примере лесотехнической техники) / К. А. Яковлев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. – Т. 6. – №1. – С. 118–122.

116. Бондаренко Г. П. Предельные и допускаемые при ремонте размеры и способы восстановления деталей фрикционных муфт тракторных коробок передач : дисс. … кандидата технических наук : 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» / Григорий Петрович Бондаренко // Всесоюзный технологический НИИ восстановления изношенных деталей машин. – К., 1988. – 234 с.

117. Балихин В. В. Технологическое обеспечение надежности / В.В. Балихин, Д.И. Севастеев. – СПб. : СПбЛТА, 2000 – 86 с.

118. Wilson T. Repair of details of machines / Wilson T. – USA, 2001 – 540 p.

119. Zuverlässigkeit Stent hoch im Kurs // Agrartechnik. – 2002. – Okt. – S. 35–39.

120. Анисимов Г. М. Основные направления повышения эксплуатационной эффективности гусеничных трелевочных тракторов / Г. М. Анисимов. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. – 456 с.

121. Білик Б. В. Проектування самохідних лісових машин / Б. В. Білик, М. Г. Адамовський // Вибір параметрів, компонування і тяговий розрахунок. – Львів : ЗУКЦ, 2004. – 160 с.

122. Бакай Б. Я. Моделирование переместительных операций на лесопромышленных складах малолесистых районов / Б. Я. Бакай // Интеграция науки, образования и производства для развития лесного хозяйства и лесопромышленных комплексов: всероссийская науч.-практ. конф. с междунар. участием, 28-30 июня 2004 г. : материалы. – Воронеж : ВГУ, 2004. – С. 30–32.

123. Быков В. В. Стратегия развития лесного машиностроения и технического сервиса / В. В. Быков // Лесная промышленность. – 2000. № 2. – С. 11–13.

124. Притыкин Д. П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования / Д. П. Притыкин. – Львів. : Металлугия, 1985. – 368 с.

125. Голубець В. М. Розроблення методу аналізу роботи та обґрунтування основних параметрів машин для освоєння гірських лісів / В. М. Голубець, Є. М. Лютий, М. П. Мартинців // Науковий вісник НЛТУ України : Інформаційні технології галузі. – 2008. – Вип. 18.8. – С. 255–262.

126. Бурдин Н. А. Технический уровень производства в лесозаготовительной промышленности / Н. А. Бурдин, В. В. Кашуба // Лесная промышленность, 2000. – № 1.

127. Алябьев В. И. Организация автоматизированного управления лесопромышленным производством / В. И. Алябьев, В. К. Курьянов, В. Н. Харин. – Воронеж : ВГЛТА, 1999. – 196 с.

128. Беккер И. Г. Ремонт технологического оборудования лесозаготовительных машин / И. Г. Беккер. – М. : Экология, 1991. – 304 с.

129. Яковлев К. А. Многокритериальная оптимизация и принятие решений в задачах управления комплексом лесотехнических машин / К. А. Яковлев, А. В. Муратов // Системы управления и информационные технологии. – 2008. –№4(34). – С. 38–41.

130. Сабадир А. Удосконалення гірських лісозаготівель / А. Сабадир, В. Коржов // Лісовий і мисливський журнал. – 2008. – №2. – С. 16–17.

131. Быков В. В. Технический сервис. Создание и функционирование технического сервиса лесозаготовительной техники / В. В. Быков, Г. И. Голубев, В. И. Игнатов, А. Ю. Тесовский. – М. : МГУЛ, 1999. – 90 с.

132. Александров В. А. Динамические нагрузки в лесосечных машинах / В. А. Александров. – Л. : ГГУ, 1984. – 152 с.

133. Яковлев К. А. Разработка концептуальной модели парка лесотехнической техники как сложной технической системы / К. А. Яковлев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – №8. – С. 14–19.

134. Тітова Л. Л. Обґрунтування особливостей технічного обслуговування МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей VI Міжнародної наукової конференції «Екобіотехнології та біопалива в АПК – Energia 2012» (27 вересня – 03 жовтня 2012 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2012. – С. 148–149.

135. Тітова Л. Л. Аналіз мобільних засобів технічного обслуговування МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції “Earth Bioresources and Environmental Biosafety: Challenges and Opportunities”, присвяченої 115-річчю НУБіП України та 15-річчю GCHERA / Секція 5. Інженерія біосистем (4–8 листопада 2013 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – С. 46–48.

136. Тітова Л. Л. Критерії технічного стану МЕЗ при їх технічному обслуговуванні / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей

Міжнародної наукової конференції “Earth Bioresources and Environmental Biosafety: Challenges and Opportunities”, присвяченої 115-річчю НУБіП України та 15-річчю GCHERA / Секція 5. Інженерія біосистем (4–8 листопада 2013 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – С. 60–61.

137. Тітова Л. Л. Узагальнені вимоги до критеріїв технічного стану МЕЗ при їх технічному обслуговуванні / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Екологобезпечні ресурсозберігаючі технології оброблення деревини», присвячена 115-річчю НУБіП України, 10-й річниці заснування кафедри технології деревообробки та черговій сесії Регіональної Координаційної ради з сучасних проблем деревинознавства (24–27 вересня 2013 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – С. 52–53.

138. Тітова Л. Л. Вимоги до критеріїв технічного стану МЕЗ при їх технічному обслуговуванні / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей XIII всеукраїнської конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (11–15 березня 2013 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – С. 127–128.

139. Тітова Л. Л. Прогнозування потреб в послугах з технічного обслуговування лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез І Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців «Перспективи та тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарських машин та знарядь» (16–17 жовтня 2014 року)/ Житомирський агротехнічний коледж. – Житомир, 2014. – С. 40–41.

140. Тітова Л. Л. Ефективність управління відновленням працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез доповідей XV міжнародної конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку

технічних та біоенергетичних систем природокористування» (23–27 березня 2015 року). Секції факультету конструювання та дизайну / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 66–67.

141. Тітова Л. Л. Інноваційність типів технічних засобів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Збірник тез ІІІ-ї міжнародної наукової конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» (19–20 березня 2015 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 52–54.

142. Тітова Л. Л. Забезпечення відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт спеціалізованими ланками / Л. Л. Тітова // Збірник тез доповідей ІІ Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» (17–18 лютого 2015 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 131–135.

143. Тітова Л. Л. Стаціонарні та мобільні засоби технічного обслуговування лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова // Збірник тез доповідей ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перші наукові кроки – 2015» (23–24 квітня 2015 року) / Подільський державний аграрно-технічний університет. – Камянець-Подільський, 2015. – С. 221–223.

144. Тітова Л. Л. Управління технічною готовністю машин для лісотехнічних робіт на етапі відновлення їх працездатності / Л. Л. Тітова // Збірник тез доповідей ІІІ-ї міжнародної наукової конференції «Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалива в АПК» в рамках роботи XXVII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО 2015» (05–06 червня 2015 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 37–38.

145. Тітова Л. Л. Нормативні показники відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Тези ІІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу» (20–22 жовтня 2015 року). – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 60–62.

146. Тітова Л. Л. Оптимізація періодичності технічного обслуговування лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський, Є. Красовські // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2015 року) / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 172–174.

147. Машкіна І. В. Дослідження та розробка методів і математичних моделей інформаційної підтримки автоматизованої системи управління ремонтно-технічного обслуговування : дис. … кандидата технічних наук : 05.13.06 «Інформаційні технології»/ Ірина Володимирівна Машкіна // НАН України. Інститут кібернетики ім. Глушкова. – К., 2003. – 177 с.

148. Дудатьев А. В. Розробка математичних моделей для оцінки та забезпечення безпеки промислових об’єктів / А. В. Дудатьев // Вінницький державний технічний університет. – Вінниця, 2000. – 161 с.

149. Баддур Алаа Методы и математические модели проектирования территориально-распределенных систем обслуживания : дисс. … кандидата технических наук : 05.13.12 «Системы автоматизации проектных работ»/ Алаа Баддур // Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – Х., 2011. – 183 с.

150. Андреев В. Н. Принятие оптимальных решений: теории и применение в лесном комплексе / В. Н. Андреев, Ю. Ю. Герасимов // Иоэнсуу : Изд-во ун-та Йоэнсуу. 1999. – 200 с.

151. Дудюк Д. Л. Імітаційне моделювання гнучких автоматизованих ліній у лісовиробничому комплексі : монографія / за ред. Д. Л. Дудюка // Д. Л. Дудюк, В. М. Максимів, Л. Я. Сорока, Р. Я. Оріховський [та ін.]. – К. : Вид-во ІСДО. 1996. – 140 с.

152. Beer R. Zum Kaltstart von Axialkolbenpumpen / R. Beer // Olhydraulik und Pneumatik. – 2014. – 8. – № 6. – S. 486–489.

153. Kusz A. Knowledge representation for expert system / A Kusz, A Marcinak // Annu. Rev.agr. Engg. – 1996. – Vol 1, № 1. – P. 7–11.

154. Dicht amm Kunden // Agrartechnik. – 2001. – Dez. – S. 12–14.

155. Pritskev A. B. The Monte-Carlo Approach to Setting Maintenance To-beranse limits / A. B. Pritskev // J. industry. Engng. 1963. – № 3. – P. 119.

156. Riesige Nachfrage // Agrartechnik. – 2001. – Sep. – S. 278–81.

157. Schaffer R. L. Optimum age replacement Policies with an increasing lost Factor / R. L. Schaffer // Technometrias. 2011. – №1.

158. А.с. 361971 СССР. Устройство для регулирования температуры рабочей жидкости в объемном гидроприводе лесопогрузчика / В. Г. Мельников, С. В. Каверзин ; (СССР). ; Опубл. 1973, Бюл. № 2. – С. 1–3.

159. Бадера Й. С. Теоретичні основи вибору системи машин для освоєння гірських лісів / Й. С. Бадера // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2006. – Вип. 16.5. – С. 62–68.

160. Яковлев К. А. Разработка автоматизированной системы поддержки жизненного цикла парка транспортно-технологических машин / К. А. Яковлев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – №10. – С. 179–182.

161. Нечипорук В. В. Метод підвищення точності системи діагностики технічного обладнання на основі стаціонаризації вимірювальної інформації : дис. … кандидата технічних наук : 05.11.16 «Інформаційно-вимірювальні системи» / Віктор Вікторович Нечипорук // Національний авіаційний університет. – К., 2007. – 114 с.

162. Mucha A. Zur jntimal instandnaltung von Mehr Komponenten-System / A. Mucha. – Vunchen, 2012. – P. 75–83.

163. Neu maschin nen ver kaufper Mehrwert-Strategie // Agrartechnik. – 2002. – Nov. – S. 66–70.

164. Neue Schlepper gunstig zur Miete // Dlz. – 2000. – № 10. – S. 138–139.

165. Pfannschmidt I. Gerinngere Reparaturkosten bei höherer Auslastung / I. Pfannschmidt // Neue Landwirtschaft. – 2001. – № 5. – S. 76–78.

166. Preinreich G. A. The economic equipment policies. An evalnation / G. A. Preinreich // Management Science. – 2007. – October.

167. Pritskev A. B. The Optimal Control of Discrete stochastic Processes / A. B. Pritskev // Bull. Engng. Experim. Stat. Coll. Engng. Ohio state Univ. – 2001, – №4. –

168. Pritskev A. B. The Setting of Maintenance Tolerance Limits / A. B. Pritskev // J. industrial Engineering. 2003. – № 2. – P. 80–86.

169. Налобіна О. О. Ресурсно-діагностична модель прогнозування технічного стану машин для лісотехнічних робіт / О. О. Налобіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С 242–246.

170. Налобіна О. О. Аналітичні положення прогнозування відновлення технічного стану машин для лісотехнічних робіт / О. О. Налобіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2016. – Вип. 241. – С 308–315.

171. Ковальов М. Ф. Модель оцінки технічної готовності на основі залишкового ресурсу одиниць машин для лісотехнічних робіт / М. Ф. Ковальов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С 297–301.

172. Ковальов М. Ф. Аналітична модель механізму відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт та її використання / М. Ф. Ковальов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2016. – Вип. 241. – С 278–283.

173. Ковальов М. Ф. Напрямки поліпшення процесів ремонту транспортних засобів / М. Ф. Ковальов, О. П. Левківський // Вісник ЖДТУ. Серія: технічні науки. – Житомир, 2014. – Вип. № 2 (69). – С 164–167.

174. Rent a Fendt // Agrartechnik. – 2001. – № 11. – S. 12–15.

175. Schlepper fn Kontrollzentrum // Top agrar. – 2002. – № 7. – S. 78–80.

176. Schweizer Landtechnik. – 2003. – № 6, 7. – S. 10–12.

177. Situations analyses // Agrartechnik. – 2002. – № 9. – S. 100–106.

178. Tnielove A. J. Strategic Reliability and Preventive maintenance / Tnielove A. J. // Operat. Res. – 2011. – Vol. 9, №1. – S. 54–62.

179. Billard W. E. Metall Spraying and the Deposition of Ceramics / Billard W. E. // Griffin, London, 1993. – P. 175–183.

180. Bondarchuk A. A maintenance simulation for complex assemblies / A. Bondarchuk, F. Jeanion // CORS Journal. – 2009. – № 1. – P. 7.

181. Eichler Chr. Grundlagen der Instandhaltung am Beispiel landtechlscher Arbeitsmittel / Chr. Eichler. Berlin : VBB Verlag Technik, 2010. – P. 105–112.

182. Ein System mauss her//Agrartechnik. – 2002. – №3. – S. 50–53.

183. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб., 2003. – 249 с.

184. Erfolggsmotor Strvice // Agrartechnik. – 2002. – Dez. – S. 45–47.

185. Feldman K. T. Experiments with, gravity-assisted heat pipes with and without circumferential grooves / Feldman K. T., Munje S. // Journ. of Energy. – 2009. – V 3, № 4. – C. 211–216.

186. Heronimus K. Zur Anwendund der Monte-Carlo-Metode im instandhaltungswesen / K. Heronimus // Dentsche Agrartechnik. – 2009. – S. 419.

187. Яковлев К. А. Анализ основных задач управления на всех этапах жизненного цикла комплекса транспортно-технологических машин / К. А. Яковлев // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – №4(34). – С. 99–103.

188. Brosch O. Eine Anwenlung der Monte-Calo-methode zur Beurteilung von reparatur Strategien wiss. z. Humbaldt / O. Brosch. – Berlin : Ges-Sprach-Wiss.Reihe. 1997. – 16, № 6. – P. 15–18.

189. Hotelling H. A General Mathematical Theory of Depreciationi of the American statistical Assosiation / H. Hotelling. – 2015, September. – P. 75–83.

190. Constant power an agricultural application Sheraton. (Доклад фирмы Cummins Американскому обществу инженеров по сельскохозяйственной технике) Twin Towers, Orlando, Florida / США. – 2001. – С. 21–24.

191. Der Plan ist das Ziel // Agrartechnik. – 2001. – № 1. – S. 90–93.

192. Die Rechnung geht auf // Agrartechnik. – 2002. – № 9. – S. 70–73.

193. Dienstleistungs-Feuerwerk // Agrartechnik. – 2002. – № 12. – S. 48–51.

194. Klare Linie // Agrartechnik. – 2002. – Jan. – S. 22–25.

195. Аврамчук Е. Ф. Технология системного моделирования / Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов ; под общ. ред. С. В. Емельянова ; Берлин: Машиностроение. – М. : Техник, 1988. – 520 с.

196. Morse P. M. A pobabilistic Model for obsolescence / P. M. Morse, C. Elston // Operat. Res. 17, 1999. – №1. – P. 65–69.

197. Красножон С. Н. Имитационное моделирование повреждений и отказов сложных технических систем с регулярной структурой : дисс. … кандидата технических наук : 05.13.06. «Информационные технологии» / Сергей Николаевич // Одесский национальный политехнический университет. – Одесса, 2005. – 164 с.

198. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель // Наука. – М., 1969. – 576 с.

199. Дацко М. В. Застосування методу декомпозиції для розв’язування задач математичного програмування з нелінійними обмеженнями / М. В. Дацко, О. М. Ланьош // Науковий вісник НЛТУ України : Інформаційні технології галузі. – 2008. – Вип. 18.8 – С. 263–267.

200. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов / А. Т. Волочко. – Минск : Белорусская наука. 2006 – 304 с.

201. Янгурський К. І. Прогнозування технічного стану виробів методами статистичної класифікації // К. І. Янгурський, І. В. Атаманова, В. М. Фаст // Науковий вісник НЛТУ України : Технологія та устаткування деревообробних підприємств. – 2006. – Вип. 16.1. – С. 198–204.

202. Астапчик С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик. – Минск : Белорусская наука, 2006 – 252 с.

203. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 354 с.

204. Андреев А. Н. Новые информационные технологии в области моделирования / А. Н. Андреев, А. В. Блинов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2000. – № 7. – С. 17–19.

205. Тітова Л. Л. Температура займання деревини при контактній взаємодії з металевою поверхнею в процесі тертя / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2012. – Вип. 170, ч. 1. – С. 321–331.

206. Тітова Л. Л. Методи технічного обслуговування лісових машин / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2014. – Вип. 155. – С. 122–127.

207. Титова Людмила. Совершенствование системы восстановления работоспособности машин для лесотехнических работ / Людмила Титова, Иван Роговский // Motrol: Motorization and Energetics in Agriculture. – 2015. – Tom 17, № 3. – P. 298–310.

208. Тітова Л. Л. Коефіцієнт готовності лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2014. – Вип. 196, ч. 3. – С. 232–238.

209. Тітова Л. Л. Аналіз періодичності техобслуговування машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С 322–328.

210. Тітова Л. Л. Імітаційність місцеперебування засобу відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський, О. В. Надточій // Сільськогосподарські машини. – 2015. – Вип. 33. – С. 140–149.

211. Тітова Л. Л. Класифікація машин для лісотехнічних робіт за нормативною періодичністю відновлення їх працездатності / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2016. – Вип. 167. – С. 243–249.

212. Тітова Л. Л. Алгоритм розподілу об'ємів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2016. – Вип. 167. – С. 290–296.

213. Тітова Л. Л. АСПР в системі відновлення працездатності лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Тези III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу» (20–22 жовтня 2015 року). – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 57–60.

214. Тітова Л. Л. Вагомість критеріїв при визначені технічного рівня МЕЗ в системі технічного обслуговування / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2013. – Вип. 134. – С. 282–286.

215. Тітова Л. Л. Удосконалення технічного контролю лісотранспортних засобів / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Аграрна наука, освіта, виробництво: європейський досвід для України» (17–18 листопада 2015 року). – Житомир: ЖНАЕУ, 2015. – С. 210–213.

216. Тітова Л. Л. Методичні положення потреби в мобільних засобах техобслуговування лісових МЕЗ / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2014. – Вип. 196, ч. 3. – С. 146–152.

217. Тітова Л. Л. Обґрунтування технічних заходів підтримання працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2015. – Вип. 160. – С. 189–195.

218. Титова Людмила. Эффективность технической эксплуатации лесных МЭС / Людмила Титова, Иван Роговский // Motrol: Motorization and power industry in agriculture. – 2014. – Том 16, № 3. – P. 313–321.

219. Патент на корисну модель 105161 України, МПК B60P 3/00 Мобільний засіб відновлення працездатності лісових мобільних енергетичних засобів / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський ; заявник і патентовласник Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський. – № u201507796 ; заявл. 05.08.15 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5.

220. Патент на корисну модель 105162 України, МПК B60R 11/00 B60R 99/00 Мобільний засіб відновлення працездатності лісових мобільних енергетичних засобів / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський ; заявник і патентовласник Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський. – № u201507797 ; заявл. 05.08.15 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5.

221. Патент на корисну модель 104884 України, МПК B60P 3/14 E04H 15/00 B60S 5/ Мобільний засіб відновлення і контролю технічного стану лісових мобільних енергетичних засобів / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський ; заявник і патентовласник Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський. – № u201507798 ; заявл. 05.08.15 ; опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

222. Тітова Л. Л. Обґрунтування режимів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова // Збірник тез доповідей І-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Інженерія систем природокористування" (11 листопада 2015 року) в рамках роботи XII Міжнародної агропромислової виставки «Агрофорум–2015». – К., 2015. – С. 90–93.

223. Войтюк В. Д. Мобільні засоби технічного обслуговування і ремонту сільськогосподарської техніки в Україні (XX – початок XXI ст.) / В. Д. Войтюк, С. І. Вечурко та ін. ; ред. В. А. Вергунов ; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. с.-г. б-ка, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – К. : ФОП "Корзун Д. Ю.", 2013. – 140 с.

ВСТУП 3

РОЗДІЛ І. СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ 8

1.1. Аналіз сучасних методів діагностування

1.1.1. Класифікація методів технічного діагностування 8

1.1.2. Аналіз методів і засобів діагностування ЦПГ дизельних двигунів 11

1.1.3. Діагностування ЦПГ за віброакустичними параметрами 22

1.2. Характеристика відмов агрегатів і систем лісогосподарської техніки –1500 та особливості роботи 25

1.3. Аналіз зношення циліндро-поршневої групи дизельних двигунів 33

1.4. Висновки і постановка задач досліджень 39

РОЗДІЛ ІІ. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІБРОАКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ 41

2.1. Математична модель виникнення віброударного імпульсу в циліндро-поршневій групі 41

2.1.1. Динаміка двигуна та формування вібрації в зоні циліндрів 42

2.1.2. Аналітичне визначення сили газів в момент удару поршня 49

2.1.3. Кінематика радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ 60

2.1.4. Динаміка радіального переміщення поршня в зазорі ЦПГ 65

2.2. Залежність ширини спектру віброакустичного сигналу від тривалості співударяння 80

2.2.1. Визначення тривалості співудару поршня об гільзу 82

2.2.2. Вибір моделі акустичного імпульсу, та визначення ширини його спектру 87

2.3. Непараметричний синтез методів прийняття рішення при діагностуванні ЦПГ 94
2.6. Висновки з розділу 102

РОЗДІЛ III. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 103

3.1. Програма експериментальних досліджень 103

3.2. Методика обчислювальних та експериментальних досліджень 104
3.2.1. Моделювання залежності фази виникнення віброударного посилання від зазору в ЦПГ 104

3.2.2. Методика зняття віброударних характеристик перекладки поршня в зазорі ЦПГ 106

3.2.3. Методика виміру структурних параметрів ЦПГ 113

3.2.4. Методика обробітку експериментальних даних 114

3.2.5. Методика оцінки оптимального частотного діапазону 118

3.2.6. Методика автоматизованого обробітку сигналів 119

3.2.7. Методика визначення віброударних посилань при діагностуванні 129

3.2.8. Методика непараметричного синтезу методу прийняття рішення з визначенням достовірності діагнозу 138
3.2.9. Методика визначення залишкового ресурсу за фазовими параметрами віброударних посилань 140

РОЗДІЛ IV РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 144
4.1. Залежність фази виникнення віброударного посилання від зазору в циліндро-поршневій групі дизельних двигунів 144
4.2. Спектральний аналіз віброімпульсів викликаних циліндро-поршневою групою дизельних установок 156
4.2.1 Теоретичний спектр віброакустичних ударів ЦПГ 156
4.2.2. Експериментальний спектр сигналу перекладки поршня 161
4.3. Залежність роботоздатності дизельного двигуна СМД-31А від параметрів фази і амплітуди віброудару 165
4.4. Результати діагностування дизельного двигуна СМД-31А 170
4.5. прогнозування залишкового ресурсу дизельних енергетичних установок 173
4.6. Економічна ефективність результатів досліджень 184

РОЗДІЛ V ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ НОРМАТИВІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ОБГРУНТУВАННІ ПЕРІОДИЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ 190
5.1. Терміни відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті 190
5.2. Зміст основних компонентів оптимізації планів-графіків робіт і заходів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт 196
5.3. Системність прийняття рішень відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт в регламенті 204
5.4. Прикладні положення реалізації та функціональні можливості системності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт 208
5.5. Перевірки адекватності розроблених інженерних нормативів 216

прийняття рішень при обґрунтуванні періодичності відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт
5.6. Прийняття інженерних рішень при оптимізації періодичності профілактичної заміни деталей 219
5.7. Висновки з розділу 222

ВИСНОВКИ 223

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 225

ДОДАТКИ 257

Д О Д А Т К И

Додаток А.1

Вхідні дані програми розрахунку фази виникнення віброударного посилання.

Ім'я змінної	Назва змінної	Значення змінної	Один. виміру
DD	Діаметр циліндра	0,12	м
r	Радіус кривошипа	0,07	м
λ	Відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна	0,28	–
ε	Ступінь стиснення	14,5	–
Pk	Тиск надуву	0,153	МПа
Vc	Об'єм камери згорання	0,00009	$м^3$
n3	Номінальна частота обертання колінчатого валу	2000	$хв^{-1}$
n	Розрахункова частота обертання колінчатого валу	750...2000 крок 250	$хв^{-1}$
Puk	Сила жорсткості компресійного кільця	155000	Н
Pum	Сила жорсткості маслоз'ємного кільця	50000	Н
ik	Кількість компресійних кілець	3	–
im	Кількість маслоз'ємних кілець	1	–
h1	Висота компресійних кілець	0,002	
h2	Висота маслоз'ємних кілець	0,0025	
Mp	Маса елементі КШМ і поршня	0,92	кг
mp	Маса поршневого комплекту	0,62	кг
H	Висота поршня	0,156	м
f2	Коефіцієнт тертя поршневого пальця об поршень	0,08	–
rp	Радіус поршневого пальця	0,02	м
μ	Динамічна в'язкість оливи	0,055	Па·с
Lj	Віддаль від поршневого пальця до центру ваги	0,006	м
Lk	Віддаль від маслоз'ємного кільця до центру ваги	0,08	м
Lu	Висота юбки поршня	0,07	м

Додаток А.2 Таблиця 1.2–Статистична характеристика роботи 8 лісогосподарської техніки -1500А протягом 4 років

№ комбайна	Наробіток, мото-год.	Загальний наробіток, т.	Кількість відмов, шт.	Загальні простої, год.	Усунення відмов, год.	Наробіток на відказ, год.	Простої на відказ, год.	Затрати на усунення відмов, год.
1	270	1063	17	60	172	62.53	3.53	10.12
2	210	641	17	37	49	37.71	2.18	2.88
3	220	760	17	95	219	44.71	5.59	12.88
4	190	720	15	90	198	48.00	6.00	13.20
5	180	485	13	192	62	37.31	14.77	4.77
6	260	926	8	120	95	115.75	15.00	11.88
7	180	520	12	138	276	43.33	11.50	23.00
8	270	840	17	76	152	49.41	4.47	8.94
∑	1780	5955	116	808	1223	438.7	63	87.7
Середнє значення	**222.50**	**744.38**	**14.50**	**101.00**	**152.88**	**54.84**	**7.88**	**10.96**

Додаток Б.1 Таблиця 1.3–Характеристика відмов агрегатів і систем лісогосподарської техніки -1500А

Назва агрегату чи системи комбайна	Простої, год.	Кількість відмов, шт.	Трудомісткість усунення, люд.год.
Паси	191	17	338
Ходова	105	8	43
Жатка	108	29	126
Молотарка	93	19	194
Гідравліка	48	22	75
Двигун	254	17	428
Електроніка	9	4	19
Всього	**808**	**116**	**1223**

Додаток Б.2

Програма розрахунку залежності фази виникнення віброударного посилання від зазору в ЦПГ (Форма документу Mathcadv15)

Вхідні дані

$DD := 0.12$ $\quad ik := 3$ $\quad \varepsilon := 14.5$

$r := 0.07$ $\quad im := 1$ $\quad Pk := 0.153$

$\lambda := 0.28$ $\quad n3 := 2000$ $\quad Mp := 0.92$

$Lu := 0.07$ $\quad Ly := 0.000005$ $\quad mp := 0.62$

$Vc := 0.00009$ $\quad n := 2000$ $\quad rp := 0.02$

$Puk := 155000$ $\quad \mu := 0.035$ $\quad f2 := 0.08$

$Pum := 50000$ $\quad h1 := 0.002$ $\quad h2 := 0.0025$

$H := 0.156$ $\quad f := 0.12$

$\omega n := n3 \cdot \frac{\pi}{30}$ $\quad Lk := 0.08$

$\xi := \frac{Puk}{Pum}$ $\quad Lj := 0.006$ $\quad \omega := n \cdot \frac{\pi}{30}$

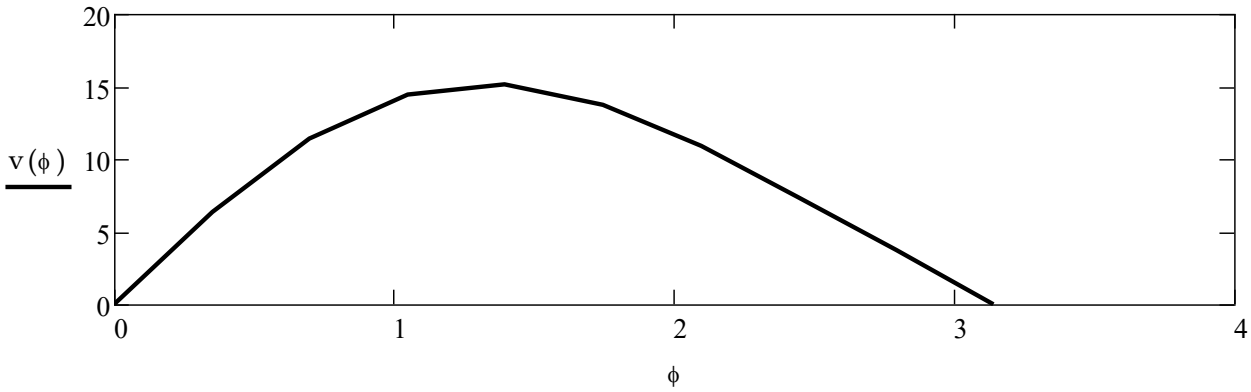
$\lambda 1 := 0.2 + 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot n$

$K := 9$

$\phi := 0, \frac{\pi}{K} .. \pi$

Розрахунок

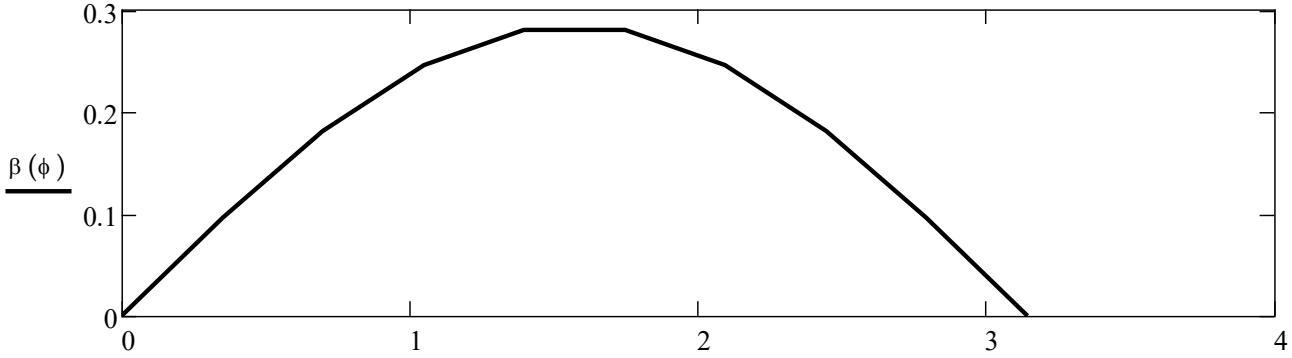
$$v(\phi) := r\cdot\omega\cdot\left(\sin(\phi) + \frac{\lambda}{2}\cdot\sin(2\cdot\phi)\right)$$



$v(\phi) =$

0
6.334
11.445
14.474
15.14
13.736
10.919
7.402
3.695
$1.293\cdot10^{-15}$

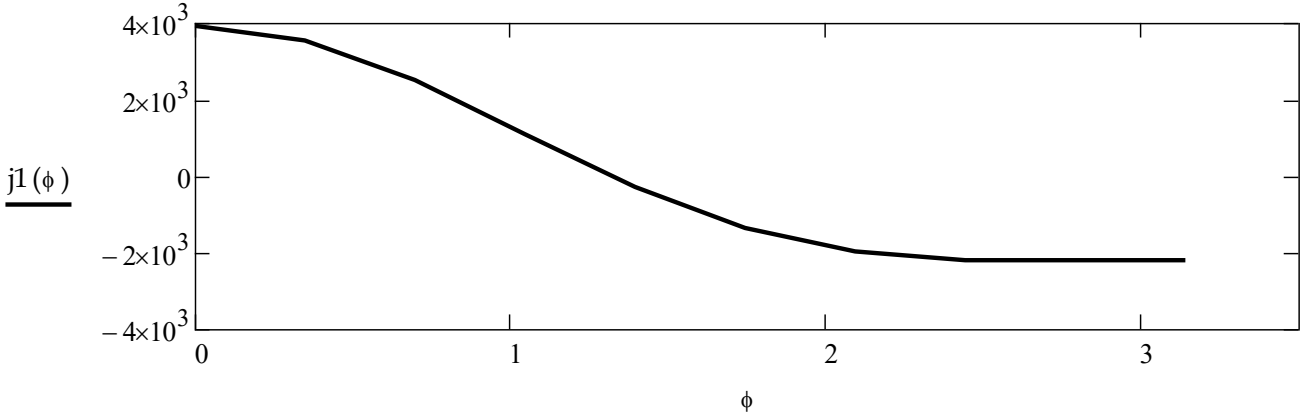
$$\beta(\phi) := \operatorname{asin}(\lambda\cdot\sin(\phi))$$



$\beta(\phi) =$

0
0.09591
0.18097
0.24493
0.27937
0.27937
0.24493
0.18097
0.09591
0

$$j1(\phi) := r\cdot\omega^{2}\cdot\left(\frac{\cos(\phi + \beta(\phi))}{\cos(\beta(\phi))} + \lambda\cdot\frac{\cos(\phi)^{2}}{\cos(\beta(\phi))^{3}}\right)^{\phi}$$



$j1(\phi) =$

3930.296
3554.076
2521.116
1106.012
-305.074
-1371.463
-1964.531
-2183.229
-2216.658
-2210.791

$\mu 1 := 0.315$

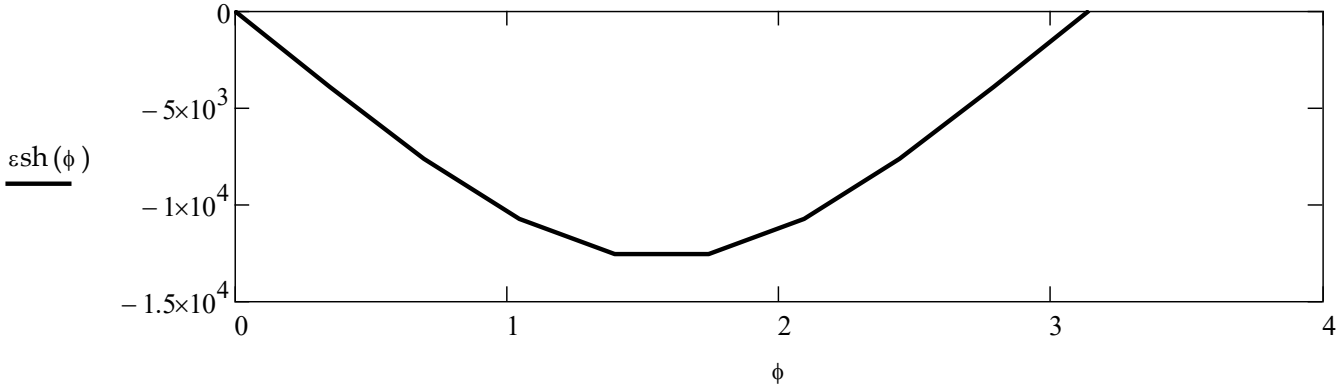
$Fko := \pi \cdot DD \cdot f \cdot Puk \cdot (h1 \cdot ik + \xi \cdot h2 \cdot im)$

$Fkp := \mu 1 \cdot \pi \cdot DD \cdot f \cdot Puk \cdot (h1 \cdot ik + \xi \cdot h2 \cdot im)$

$$\varepsilon sh(\phi) := \lambda \cdot \omega^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{\lambda^2 - 1}{\left(1 - \lambda^2 \cdot \sin(\phi)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$\varepsilon sh(\phi) =$

0
-3925.28671
-7644.28224
-10735.57916
-12551.23825
-12551.23825
-10735.57916
-7644.28224
-3925.28671
$-1.38616 \cdot 10^{-12}$



$$Pt(\phi) := \frac{4DD\cdot\mu\cdot v(\phi)}{\gamma(\phi)}\cdot\left(2\cdot\log\left(\frac{Lu+\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}{\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}\right)-3\cdot\frac{Lu}{Lu+2\cdot\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}\right)\cdot\sqrt{\frac{(4\cdot Lu+DD)}{DD}}$$

$$Pgd(\phi) := \frac{H\cdot 6\cdot DD\cdot\mu\cdot v(\phi)}{(\gamma(\phi))^2\cdot(D+Lu)}\cdot\left(\ln\left(\frac{Lu+\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}{\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}\right)-2\cdot\frac{Lu}{Lu+2\cdot\frac{h(\phi)}{\gamma(\phi)}}\right)$$

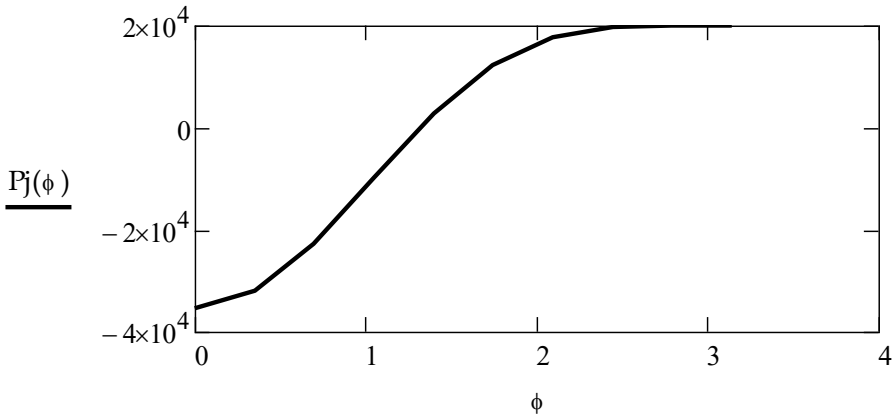
$n2 := 1.0 + \frac{130}{n}$ $\quad n1 := 1.46 - \frac{100}{n}$ $\quad Pn := 0.94\cdot Pk$ $\quad Pj(\phi) := -Mp\cdot 9.807\cdot j1(\phi)$

$b0 := 0.008\cdot\varepsilon^{n1}$ $\quad b2 := (Pn - 0.008)\cdot\varepsilon^{n1}$ $\quad Fp := \pi\left(\frac{DD^2}{4}\right)$ $\quad Pc := b0 + b2\cdot\left(\frac{\omega}{\omega n}\right)^2$ $\quad Pz := Pc\cdot\lambda 1$

$$S1(\phi) := r\cdot\left[\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)-\left(\cos(\phi)+\frac{1}{\lambda}\cdot\cos(\beta(\phi))\right)\right]$$

$$Vt(\phi) := S1(\phi)\cdot Fp$$

$$Pg(\phi) := \frac{Pz}{\left(1+\frac{Vt(\phi)}{Vc}\right)^{n2}}\cdot Fp\cdot 10^6$$

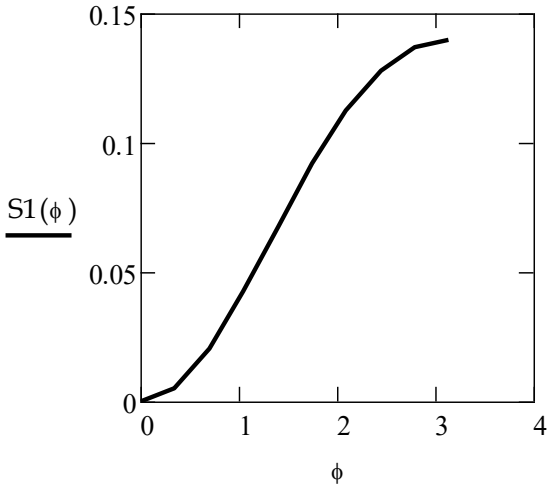


$mp := 0.62\cdot 9.8$ $\quad I0 := 0.3483$ $\quad msh := 4.28\cdot 9.8$

$l := \left(\frac{r}{\lambda}\right)$ $\quad l1 := 0.725$ $\quad l2 := 1 - l1$ $\quad m2 := \frac{I0}{l2\cdot l}$ $\quad m1 := \frac{I0}{l1\cdot l}$ $\quad I1 := m1\cdot l1^2 + m2\cdot l2^2$ $\quad m3 := msh - \frac{I0}{l2\cdot l} - \frac{I0}{l1\cdot l}$

$S1(\phi) =$

0
0.00537
0.02046
0.04246
0.06754
0.09185
0.11246
0.12771
0.13693
0.14



$Pg(\phi) =$

$1.83558 \cdot 10^5$
$1.05982 \cdot 10^5$
47320.90682
25695.1822
16716.06401
12416.97705
10166.5791
8954.53217
8348.81096
8164.29564

$Pj(\phi) =$

-35460.85801
-32066.43685
-22746.6198
-9978.92871
2752.51497
12373.94212
17724.86662
19698.05712
19999.66722
19946.73263

$$N1(\phi) := \left[-\left[\frac{(mp + m1)}{9.8} + \frac{m3}{9.8} \cdot \frac{l2}{1}\right] \cdot j1(\phi) + Pg(\phi) - Fko\right] \cdot \frac{\lambda \cdot \sin(\phi)}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin(\phi)^2}} - \frac{\left(\frac{m3}{9.8} \cdot l1 \cdot l2\right) \cdot \varepsilon sh(\phi)}{l \cdot \sqrt{\left(1 - \lambda^2 \cdot \sin(\phi)^2\right)}}$$

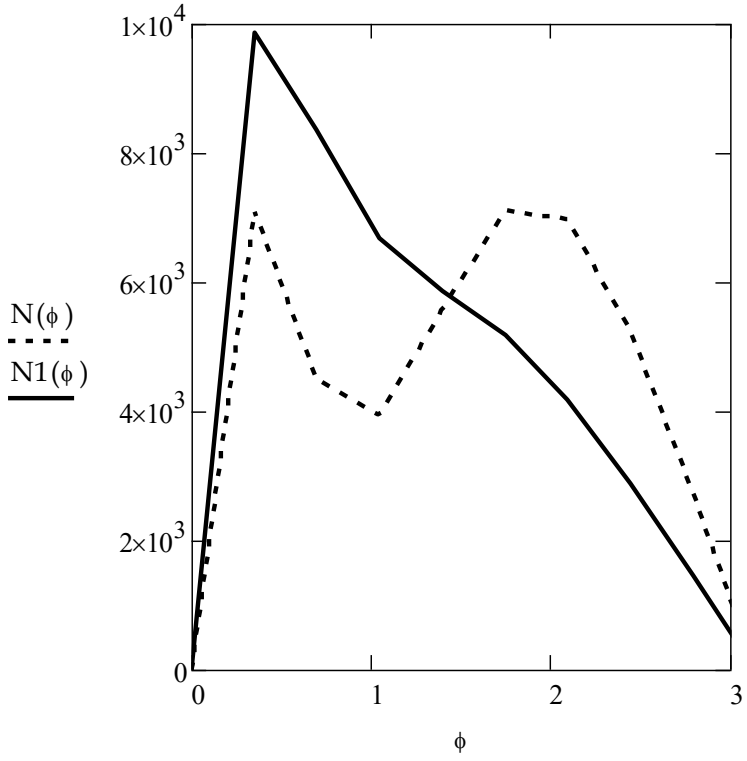
$$Pjp(\phi) := (mp + m1) \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\phi) + \lambda \cdot \cos(2\phi))$$

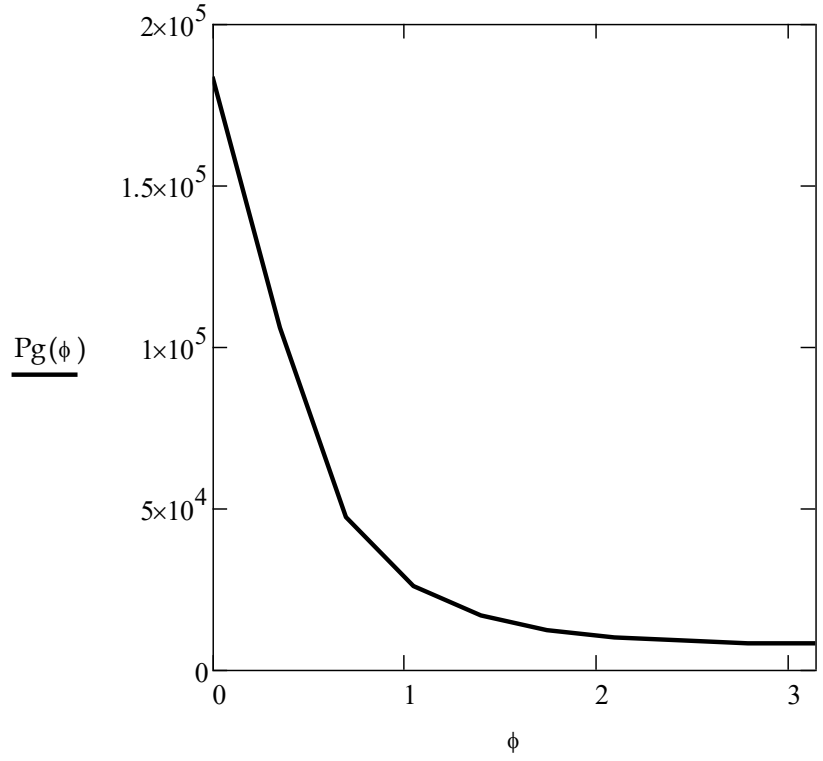
$$N(\phi) := (Pg(\phi) + Pj(\phi)) \cdot \tan(\beta(\phi))$$

$$M0(\phi) := Pjp(\phi) \cdot rp \cdot f2$$

$M0(\phi) =$

86.54587
78.03903
55.08279
24.34103
-6.04913
-29.53122
-43.27294
-48.50781
-49.03366
-48.68205





$$\frac{d^2}{d\phi^2}\left(h = \frac{1}{m\cdot\omega^2}\right)\cdot\left[-H\cdot Pgd + N(\phi)\cdot\left(\cos(\gamma(\phi)) - \frac{\sin(\gamma(\phi))}{\tan(\beta(\phi))}\right) - Fkp\right]$$

$$\frac{d^2}{d\phi^2}\left(\gamma = \frac{1}{I0\cdot\omega^2}\right)\cdot\left[(-H\cdot Pgd\cdot Lj + N(\phi)\cdot Lj\cdot\cos(\gamma(\phi)) + Fkp)\cdot Lk - M0(\phi) - N(\phi)\cdot\frac{Lu}{\tan(\beta(\phi))} + Pt\cdot\frac{DD}{2}\right]$$

$$\frac{d^2}{d\phi^2}\left(h = \frac{1}{Mp\cdot\omega^2}\right)\cdot\left[-\left[\left[H\cdot 6\cdot DD\cdot\mu\cdot\frac{v(\phi)}{\left[\gamma^2\cdot(DD+Lu)\right]}\right]\ldots + 1\,\frac{(\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot Lu\cdot\gamma + 2\cdot\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot h - \ln(h)\cdot Lu\cdot\gamma - 2\cdot\ln(h)\cdot h - 2\cdot Lu\cdot\gamma)}{(Lu\cdot\gamma+2\cdot h)}\right] + N1(\phi)\cdot\left(\cos(\gamma(\phi)) - \frac{\sin(\gamma(\phi))}{\tan(\beta(\phi))}\right) - Fkp\right]\ldots\right]$$

$$\frac{d^2}{d\phi^2}\left(\gamma = \frac{1}{I0\cdot\omega^2}\right)\cdot\left[-\left[H\cdot 6\cdot DD\cdot\mu\cdot\frac{v(\phi)}{\left[\gamma^2\cdot(DD+Lu)\right]}\cdot\frac{\left(\begin{array}{l}\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot Lu\cdot\gamma + \blacksquare\ \ldots\\ + 2\cdot\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot h - \ln(h)\cdot Lu\cdot\gamma - 2\cdot\ln(h)\cdot h - 2\cdot Lu\cdot\gamma\end{array}\right)}{(Lu\cdot\gamma+2\cdot h)}\right]\cdot Lj\ \ldots \right.$$
$$+ N1(\phi)\cdot Lj\cdot\cos(\gamma(\phi)) + Fkp\cdot Lk - M0(\phi) - N1(\phi)\cdot\frac{Lu}{\tan(\beta(\phi))}\ \ldots$$
$$\left. + 4\cdot DD\cdot\mu\cdot\frac{v(\phi)}{\gamma}\cdot\frac{\left[\begin{array}{l}(2\cdot\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot Lu\cdot\gamma + 4\cdot\ln(Lu\cdot\gamma+h)\cdot h - 2\cdot\ln(h)\cdot Lu\cdot\gamma)\ \ldots\\ + \blacksquare - (4\cdot\ln(h)\cdot h - 3\cdot Lu\cdot\gamma\cdot\ln(2) - 3\cdot Lu\cdot\gamma\cdot\ln(5))\end{array}\right]}{[(\ln(2)+\ln(5))\cdot(Lu\cdot\gamma+2\cdot h)]}\cdot\sqrt{\frac{(4\cdot Lu+DD)}{DD}}\right]$$

$$y := \begin{pmatrix} 0.00046 \\ 0 \\ 0.00295 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$start_\gamma := 0.0014$ $\quad$ $starth := 0.00022$

$end_\gamma := 0.0054$ $\quad$ $endh := 0.00086$

$incr_\gamma := .00025$ $\quad$ $incrh := .00004$

$\gamma := Range2Vec(start_\gamma, end_\gamma, incr_\gamma)$

$h := Range2Vec(starth, endh, incrh)$ $\quad$ $J := augment(\gamma, h)$

```
Range2Vec(s, e, i) := | count ← 0
                      | for i ∈ s, s + i .. e
                      |   | v_count ← i
                      |   | count ← count + 1
                      | v
```

$J^T =$

	0	1	2	3	4	5	6
0	0.0014	0.00165	0.0019	0.00215	0.0024	0.00265	0.0029
1	0.00022	0.00026	0.0003	0.00034	0.00038	0.00042	...

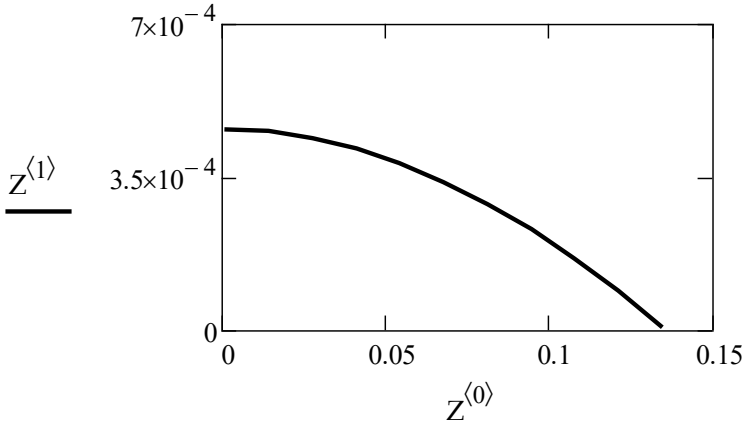
$$
D(\phi, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ \dfrac{1}{Mp \cdot 9.8 \cdot \omega^2} \cdot \left[-\left[H \cdot 6 \cdot DD \cdot \mu \cdot \dfrac{v(\phi)}{\left[(y_2)^2 \cdot (DD + Lu) \right]} \cdot \dfrac{\left[\begin{pmatrix} \ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot Lu \cdot y_2 \ \ldots \\ + 2 \cdot \ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot y_0 - \ln(y_0) \cdot Lu \cdot y_2 \end{pmatrix} \ldots \\ + (-2 \cdot \ln(y_0) \cdot y_0 - 2 \cdot Lu \cdot y_2) \end{bmatrix}}{(Lu \cdot y_2 + 2 \cdot y_0)} \right] - Pg(\phi) \cdot f \cdot \cos(y_2) \ \ldots \right. \\ \left. + N1(\phi) \cdot \left(\cos(y_2) - \dfrac{\sin(y_2)}{\tan(\beta(\phi))} \right) - Fkp \right] \\ y_3 \\ \dfrac{1}{I0 \cdot \omega^2} \cdot \left[-\left[6 \cdot H \cdot DD \cdot \mu \cdot \dfrac{v(\phi)}{\left[(y_2)^2 \cdot (DD + Lu) \right]} \cdot \dfrac{\left[\begin{matrix} (\ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot Lu \cdot y_2 + 2 \cdot \ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot y_0) \ \ldots \\ + (-\ln(y_0) \cdot Lu \cdot y_2 - 2 \cdot \ln(y_0) \cdot y_0 - 2 \cdot Lu \cdot y_2) \end{matrix} \right]}{(Lu \cdot y_2 + 2 \cdot y_0)} \right] \cdot Lj \ \ldots \right. \\ \left. + N1(\phi) \cdot Lj \cdot \cos(y_2) + Fkp \cdot Lk - M0(\phi) - N1(\phi) \cdot \dfrac{Ly}{\tan(\beta(\phi))} + 4 \cdot DD \cdot \mu \ \ldots \right. \\ \left. + \dfrac{v(\phi)}{y_2} \cdot \dfrac{\left[\begin{matrix} 2 \cdot \ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot Lu \cdot y_2 + 4 \cdot \ln(Lu \cdot y_2 + y_0) \cdot y_0 \ \ldots \\ + (-2 \cdot \ln(y_0) \cdot Lu \cdot y_2 - 4 \cdot \ln(y_0) \cdot y_0) - 3 \cdot Lu \cdot y_2 \cdot \ln(2) - 3 \cdot Lu \cdot y_2 \cdot \ln(5) \end{matrix} \right]}{\left[(\ln(2) + \ln(5)) \cdot (Lu \cdot y_2 + 2 \cdot y_0) \right]} \cdot \sqrt{\dfrac{(4 \cdot Lu + DD)}{DD}} \right] \end{bmatrix}
$$

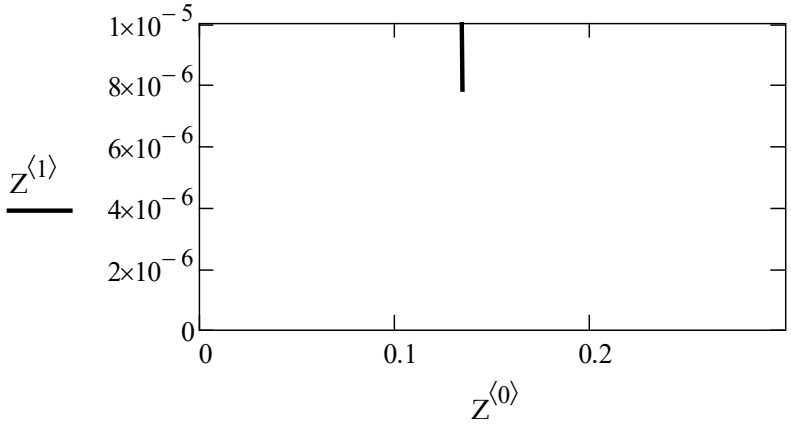
$Faza_max := 0.13468081$ $\qquad k1 := \dfrac{\pi}{19.35}$ $\qquad k1 = 9.30233 \cdot deg$ $\qquad \theta := k1 + Faza_max$

$Z := \text{Bulstoer}(y, 0.001, \text{Faza_max}, 10, D)$ $\qquad \left(Z^{\langle 1 \rangle}\right)_{10} = 7.73429 \times 10^{-6}$

$$\text{faza} := \left| \begin{array}{l} \text{faza} \leftarrow 0.04 \\ \text{TOL} \leftarrow 0.0001 \\ \text{maximum} \leftarrow 0.12 \\ \text{while } \left(\text{bulstoer}(y, 0.0001, \text{faza}, 0.01, D, 2, 0.01)^{\langle 1 \rangle}\right)_1 > 1 \cdot 10^{-4} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{faza} \leftarrow \text{faza} + 0.001 \\ \text{break if faza} \geq \text{maximum} \end{array} \right. \\ \text{faza} \leftarrow 0 \quad \text{on error } \left(\text{bulstoer}(y, 0, \text{faza}, 0.01, D, 2, 0.01)^{\langle 1 \rangle}\right)_1 \\ \text{faza} \end{array} \right.$$

$$\text{Skor_udar} := \left| \begin{array}{l} \text{Faza_max} \leftarrow \text{Faza_max} \\ \omega \leftarrow \omega \\ y_0 \leftarrow y_0 \\ t \leftarrow \dfrac{\text{Faza_max}}{\omega} \\ a \leftarrow 2 \cdot \dfrac{y_0}{t^2} \\ t1 \leftarrow t \\ \text{Skor_udar} \leftarrow a \cdot t1 \\ \text{Skor_udar} \end{array} \right.$$





```
faza := | faza ← 0.12
        | TOL ← 0.0001
        | maximum ← 0.15
        | while (bulstoer(y, 0.1, faza, 0.01, D, 2, 0.01)^⟨1⟩)_1 > 1·10^-4
        |     | faza ← faza + 0.001
        |     | break  if  faza ≥ maximum
        | faza
        | i ← √-1
        | faza ← faza
        | TOL ← 0.000001
        | while (bulstoer(y, 0.1, faza, 0.0001, D, 2, 0.0001)^⟨1⟩)_1 > 1·10^-8
        |     | faza ← faza + 0.000000125
        |     | break  if  faza ≥ maximum
        | faza ← 0  on error (rkadapt(y, 0, faza, 0.001, D, 2, 0.001)^⟨1⟩)_1
        | faza ← faza
        | faza
```

$y_0 = 0.00046$

$y_1 = 0$

$y_2 = 0.00295$

$y_3 = 0$

$Faza_max = 0.13468$

$Faza_max = 7.71664 \cdot deg$

$Skor_udar = 1.43067$

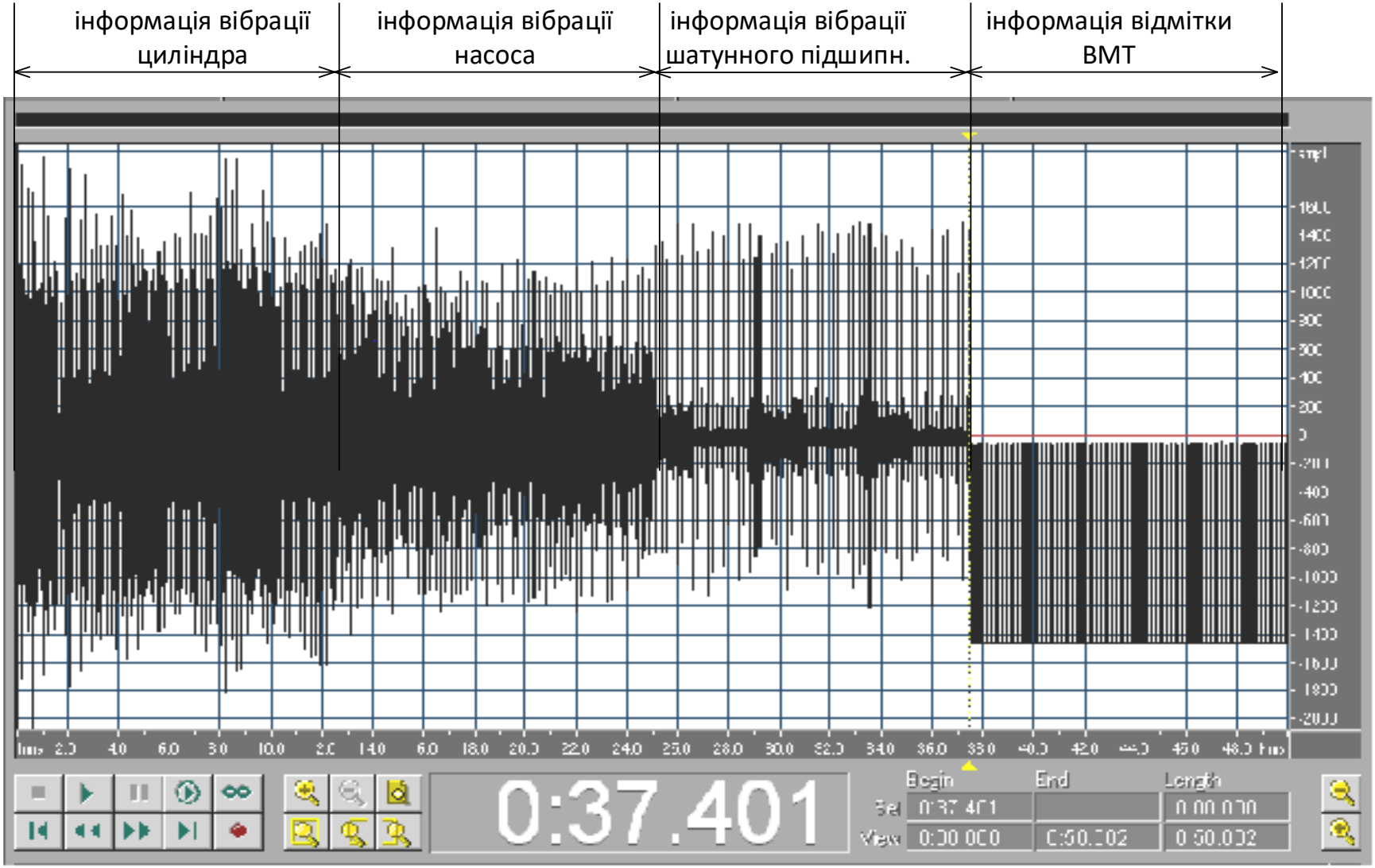
$Prom1 := stack(j, Faza)$ $Prom2 := stack(j, Skor_udara)$ $Risult := augment(augment(Zazor, Prom1), Prom2)$

Risult =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	"h \ n"	750	1000	1250	1500	1750	2000	750	1000	1250	1500	1750	2000
1	0.00022	0.13399	0.1231	0.1132	0.10466	0.09757	0.09155	0.25791	0.37429	0.5088	0.66037	0.82641	1.00661
2	0.00026	0.14704	0.13496	0.12381	0.11441	0.10652	0.0999	0.27775	0.40348	0.54979	0.71396	0.89462	1.09022
3	0.0003	0.15943	0.14599	0.13371	0.12342	0.11485	0.10766	0.29558	0.43039	0.5874	0.76363	0.95738	1.16722
4	0.00034	0.17106	0.15636	0.14304	0.13191	0.12269	0.11494	0.31221	0.45542	0.6223	0.80976	1.01573	1.23906
5	0.00038	0.18202	0.16612	0.15185	0.13994	0.13006	0.12182	0.32793	0.47908	0.65514	0.85306	1.07087	1.30662
6	0.00042	0.19263	0.17551	0.16032	0.14763	0.13714	0.12839	0.34248	0.5012	0.68585	0.89376	1.12246	1.3703
7	0.00046	0.20279	0.18458	0.1684	0.15498	0.14391	0.13468	0.35631	0.52204	0.71512	0.93249	1.17157	1.43074
8	0.0005	0.2125	0.19321	0.1762	0.16204	0.1504	0.14071	0.3696	0.542	0.7429	0.96938	1.21845	1.48845
9	0.00054	0.22202	0.20161	0.18371	0.16889	0.15668	0.14653	0.38205	0.56097	0.76955	1.0045	1.26322	1.54363
10	0.00058	0.23119	0.20981	0.19101	0.17551	0.16275	0.15217	0.39407	0.57899	0.79496	1.0382	1.30618	1.59662
11	0.00062	0.24004	0.21771	0.19811	0.18192	0.16864	0.15762	0.40572	0.59646	0.81933	1.07068	1.34748	1.64766
12	0.00066	0.24879	0.22541	0.20494	0.18811	0.17431	0.16288	0.41671	0.61325	0.84311	1.10224	1.38775	1.69729
13	0.0007	0.25732	0.23296	0.21166	0.19419	0.17988	0.16803	0.4273	0.62932	0.86582	1.13246	1.42631	1.74497
14	0.00074	0.26566	0.24032	0.21823	0.20012	0.18531	0.17305	0.43755	0.64491	0.88774	1.16167	1.46362	1.7912
15	0.00078	0.27381	0.24753	0.22465	0.20591	0.19061	0.17796	0.44748	0.65997	0.90899	1.19004	1.49984	...

Додаток В.1

Структура інформації файлу *.USM



Додаток В.2

Текст підпрограми, яка реалізує алгоритм двостороннього контрасту, з набором змінних параметрів роботи алгоритму.

{********** Початок процедури Diag_MTW **********}

Procedure Diag_MTW1

(NameParam : **String**;

NameFRabHod, NameFRes, NameFileSignal : **String**;

FkolenVal :Real;

NumbCyl :Cylinders;

SelectVMT :Byte);

{ Здійснює діагностику сигналу методом трьох вікон, результати виводить у тимчасовий файл }

var

FDpT :text;

FDp : file of Real;

begin

UgBegC:=-10{-190}; *{ Кут початку стробу відносно ВМТ робочого ходу}*

UgEndC:=25{130}; *{ Кут кінця стробу відносно ВМТ робочого ходу}*

{UgBeg:=–140; *{Кут початку відносно ВМТ робочого ходу}*

{UgEnd:=150; *{Кут кінця стробу відносно ВМТ робочого ходу}*

NPotFil:=350; *{Кількість точок, що втрачаються при фільтрації}*

NLeft:=100; *{Леве бокове вікно}*

NRight:=120; *{Праве бокове вікно}*

NPromegLeft:=100; *{Леве проміжне вікно}*

NPromegRight:=120; *{Праве проміжне вікно}*

NCenter:=50; *{Центральне вікно}*

```
DeltaTWin:=1;              {Зсув вікон при діагностиці }
DeltaNWindVar:=1;          {Зсув внутрішнього вікна в боковому}
NLeftVar:={NLeft} 20;      {Ліве (плаваюче вікно) }
NRightVar:={NRight} 20;    {Праве (плаваюче) вікно}
{ SelectVMT:=2;            {0-все ВМТ, 1-непарні ВМТ, 2-парні ВМТ}
SelectMO:=0;               {0-все вікна, 1-тільки ліві , 2-тільки праві}

APFil:=1;                  {Процент в полосі пропускання}
TIPFil:=2;                 {Batterw=1; Chebychev=2; Cayer=3;}
VIDFil:=2;                 {LowPass=1; BandPass=2; HighPass=3;}
KPFil:=7;                  {Порядок фільтра (1...7)}
FSRFil:=14000;             {Частота зрізу (при VIDFil=1 чи 3;)}
FNFil:={9000}65000;        {Нижня частота зрізу (при VIDFil=2)}
FVFil:={12000}75000;       {Верхня частота зрізу (при VIDFil=2)}

PorogMOLeft:=1.1;          {Поріг для лівого вікна}
PorogMORight:=1.1;         {Поріг для правого вікна}
PorogC0:=0.5;              {Поріг для ОП}
PorogC1:=90000;            {Поріг для ОП}
PorogC:=45;                {Поріг для ОП}
FlagView:=    {false}
              true;        {Знак перегляду огинаючої виявлених сигналів (true-
                           переглядати, false -не переглядати)}
```

Додаток Д

Загальний вигляд текстового файлу створеного програмою, що реалізує алгоритм двостороннього контрасту.

Файл: exp#12.usm диагностика сопряжения: cil_f
UgBegC= 0.0000 UgEndC= 25.0000 NPotFil= 350
NLeftVar= 10 NLeft= 100 NPromegLeft= 100
NCenter= 30 NPromegRight= 120 NRight= 80 NRightVar= 10
DeltaTWin= 1 DeltaNWindVar= 1 NWind= 470
SelectVMT= 1 SelectMO=0
APFil: 1 TIPFil: 2 VIDFil: 2 KPFil: 7
FSRFil= 140000.0000 FNFil= 68000.0000 FVFil= 71000.0000
PorogMOLeft= 1.1000 PorogMORight= 1.1000

PorogC0= 0.5000 PorogC1= 90000.0000 PorogC= 45.0000
Zapazd= 120

N% ВМТ	Початок стробу	Кінець стробу	Т_нач максим.	Т_кон максим.	Кут макс.	МО лев.	МО прав.	МО центр.	ДП
3	0.003457	0.119008	0.004312	0.004547	16.83	0.78	6.62	418.73	112.99
5	0.120647	0.236198	0.121502	0.121737	21.57	2.58	6.97	504.84	105.64
7	0.237837	0.353388	0.238692	0.238927	17.06	3.63	7.3	345.01	63.09
9	0.355027	0.470578	0.355882	0.356117	16.91	3.68	3.52	388.09	107.7
11	0.472217	0.587768	0.473072	0.473307	16.53	0.6	2.83	135.77	79.04
13	0.589407	0.704958	0.590262	0.590497	16.86	2.27	3.42	125.02	43.86
15	0.706597	0.822148	0.707452	0.707687	16.56	3.77	0	110.99	58.74
17	0.823787	0.939338	0.824642	0.824877	16.92	2.31	6.18	607.41	142.87
19	0.940977	1.056528	0.941832	0.942067	15.68	1.02	0.71	52.01	59.79
21	1.058167	1.173718	1.059022	1.059257	16.94	1.4	5.47	468.69	136.4
23	1.175357	1.290908	1.176212	1.176447	17.14	3.18	1.23	138.17	62.61
25	1.292547	1.408098	1.293402	1.293637	10.34	0.28	0.38	35.91	107.37
27	1.409737	1.525288	1.410592	1.410827	15.74	2.36	0.14	112.43	89.53
29	1.526927	1.642478	1.527782	1.528017	10	0.79	5.18	176.31	59.05
31	1.644117	1.759668	1.644972	1.645207	22.57	2.57	7.31	606.92	122.72
33	1.761307	1.876858	1.762162	1.762397	10.24	2.41	3.45	349	118.89
35	1.878497	1.994048	1.879352	1.879587	17.21	1.76	1.94	240.5	129.79
37	1.995687	2.111238	1.996542	1.996777	16.79	1.58	5.23	275.93	80.93
39	2.112877	2.228428	2.113732	2.113967	16.76	2.36	0.18	60.38	47.32
41	2.230067	2.345618	2.230922	2.231157	17.4	3.79	1.1	242.52	98.88
43	2.347257	2.462808	2.348112	2.348347	16.79	1.56	4.4	398.17	133.38
45	2.464447	2.579998	2.465302	2.465537	16.3	0.74	3.7	250.59	112.66
47	2.581637	2.697188	2.582492	2.582727	16.14	2.29	2.4	264	112.26
49	2.698827	2.814378	2.699682	2.699917	17.14	2.5	2.74	331.62	126.34
51	2.816017	2.931568	2.816872	2.817107	16.65	0.19	4.86	178	70.32
53	2.933207	3.048758	2.934062	2.934297	13.45	1.04	7.87	637.59	143.01
55	3.050397	3.165948	3.051252	3.051487	23.35	3.58	1.2	238.5	99.61
57	3.167587	3.283138	3.168442	3.168677	18.81	2.91	5.69	611.7	142.14
59	3.284777	3.400328	3.285632	3.285867	16.28	1.57	6.2	463.82	119.26

61	3.401967	3.517518	3.402822	3.403057	16.32	3.61	4.96	549.09	127.91
63	3.519157	3.634708	3.520012	3.520247	17.01	1.55	5.5	467.61	132.51
65	3.636347	3.751898	3.637202	3.637437	16.25	1.41	4.53	370.52	124.51
67	3.753537	3.869088	3.754392	3.754627	16.71	2.98	4.38	395.73	107.42
69	3.870727	3.986278	3.871582	3.871817	16.94	2.95	1.97	110.74	44.93
71	3.987917	4.103468	3.988772	3.989007	17.08	0.8	3.94	106.45	44.9
73	4.105107	4.220658	4.105962	4.106197	16.91	2.72	5.35	503.04	124.5
75	4.222297	4.337848	4.223152	4.223387	16.06	1.47	4.98	436.51	135.17
77	4.339487	4.455038	4.340342	4.340577	16.21	0.43	6.39	387.23	113.43
79	4.456677	4.572228	4.457532	4.457767	16.61	0.81	7.91	610.48	139.96
81	4.573867	4.689418	4.574722	4.574957	16.61	2.61	5.03	227.27	59.37
83	4.691057	4.806608	4.691912	4.692147	17.38	2.75	4.73	154.85	41.39
85	4.808247	4.923798	4.809102	4.809337	22.92	0.31	4.04	129.4	59.32
87	4.925437	5.040988	4.926292	4.926527	9.765	0.11	3.59	140.63	75.83
89	5.042627	5.158178	5.043482	5.043717	19.53	1.22	7.52	346.67	79.22
91	5.159817	5.275368	5.160672	5.160907	16.71	0.57	2.01	69.279	53.57
93	5.277007	5.392558	5.277862	5.278097	13.09	0.27	5.84	226.38	74.03
95	5.394197	5.509748	5.395052	5.395287	19.77	2.89	5	225.43	57.07
97	5.511387	5.626938	5.512242	5.512477	16.4	2.77	5.13	316.72	80.11
99	5.628577	5.744128	5.629432	5.629667	16.34	2.61	4.45	264.4	74.79
101	5.745767	5.861318	5.746622	5.746857	16.92	0.39	3.57	207.57	104.73
103	5.862957	5.978508	5.863812	5.864047	21.87	0.19	7.96	210.94	51.66
105	5.980147	6.095698	5.981002	5.981237	16.75	1.85	4.8	320.66	96.248
107	6.097337	6.212888	6.098192	6.098427	16.51	2.91	1.38	115.09	53.607
109	6.214527	6.330078	6.215382	6.215617	17.1	2.71	2.65	337.33	125.42
111	6.331717	6.447268	6.332572	6.332807	16.96	1.48	5.22	304.68	90.72
113	6.448907	6.564458	6.449762	6.449997	16.92	0.19	3.41	76.616	42.33
115	6.566097	6.681648	6.566952	6.567187	16.93	0.67	5.42	341.31	111.79
117	6.683287	6.798838	6.684142	6.684377	16.87	1.24	3.98	167.35	64.086
119	6.800477	6.916028	6.801332	6.801567	16.22	0.84	6.42	445.18	122.44
121	6.917667	7.033218	6.918522	6.918757	16.1	1.93	0.03	129.55	131.2
123	7.034857	7.150408	7.035712	7.035947	16.88	1.75	3	296.39	124.36
125	7.152047	7.267598	7.152902	7.153137	16.32	2.42	6.61	448.78	99.261
127	7.269237	7.384788	7.270092	7.270327	15.96	1.6	7.12	582.95	133.5
129	7.386427	7.501978	7.387282	7.387517	16.26	3.37	5.2	566.92	132.22
131	7.503617	7.619168	7.504472	7.504707	16.42	2.49	5.87	320.74	76.687
133	7.620807	7.736358	7.621662	7.621897	16.19	0.21	7.65	405.85	103.13
135	7.737997	7.853548	7.738852	7.739087	9.711	3.45	2.9	414.44	130.32
137	7.855187	7.970738	7.856042	7.856277	16.82	1.22	7.23	507.81	120
139	7.972377	8.087928	7.973232	7.973467	16.66	0.1	3.63	145.27	77.581
141	8.089567	8.205118	8.090422	8.090657	16.76	1.56	6.95	278.89	65.465
143	8.206757	8.322308	8.207612	8.207847	21.4	0.12	0.31	17.970	82.192
145	8.323947	8.439498	8.324802	8.325037	16.09	3.43	7.48	349.85	64.072
147	8.441137	8.556688	8.441992	8.442227	16.42	1.6	1.31	190.86	130.43
149	8.558327	8.673878	8.559182	8.559417	16.39	2.44	0.93	121.31	71.744
151	8.675517	8.791068	8.676372	8.676607	17.51	3.5	0.94	293.16	131.8
153	8.792707	8.908258	8.793562	8.793797	10.3	2.38	4.64	328.25	93.51
155	8.909897	9.025448	8.910752	8.910987	16.49	3.17	5.85	315.56	69.929
157	9.027087	9.142638	9.027942	9.028177	16.07	2.36	5.35	544.74	141.12
159	9.144277	9.259828	9.145132	9.145367	16.16	2.27	6.47	237.5	54.302
161	9.261467	9.377018	9.262322	9.262557	16.28	2.69	7.97	597.9	112.06

163	9.378657	9.494208	9.379512	9.379747	16.89	0.04	1.63	60.294	71.94
165	9.495847	9.611398	9.496702	9.496937	17.44	1.36	3.1	286.48	128.11
167	9.613037	9.728588	9.613892	9.614127	16.6	3.08	4.64	405.02	104.76
169	9.730227	9.845778	9.731082	9.731317	21.74	3.47	7.68	492.91	88.333
171	9.847417	9.962968	9.848272	9.848507	17.11	2.9	3.05	316.3	106.21
173	9.964607	10.08016	9.965462	9.965697	10.26	3.57	0.96	217.11	95.59
175	10.0818	10.19735	10.08265	10.08289	16.11	2.14	0.37	119.44	95.08
177	10.19899	10.31454	10.19984	10.20008	16.49	3.12	6.08	478.52	103.92
179	10.31618	10.43173	10.31703	10.31727	17.33	0.78	0.01	25.77	64.13
181	10.43337	10.54892	10.43422	10.43446	17.07	3.18	3.41	462.18	140.04
183	10.55056	10.66611	10.55141	10.55165	16.39	3.39	3.69	223.65	63.12
185	10.66775	10.7833	10.6686	10.66884	16.99	2.51	5.99	245.56	57.71
187	10.78494	10.90049	10.78579	10.78603	16.54	2.46	4.47	180.9	52.11
189	10.90213	11.01768	10.90298	10.90322	16.41	1	7.37	321.05	76.63
191	11.01932	11.13487	11.02017	11.02041	10.11	3.15	6.85	442.36	88.4
193	11.13651	11.25206	11.13736	11.1376	16.55	2.85	3.92	153.11	45.14
195	11.2537	11.36925	11.25455	11.25479	16.76	0.32	5.97	432.45	137.2
197	11.37089	11.48644	11.37174	11.37198	16.92	3.42	2.04	287.79	105.27
199	11.48808	11.60363	11.48893	11.48917	17.28	1.22	6.33	263.12	69.55
201	11.60527	11.72082	11.60612	11.60636	17.2	1.89	4.42	277.94	88.03
203	11.72246	11.83801	11.72331	11.72355	16.06	0.76	4.17	134.84	54.53
205	11.83965	11.9552	11.8405	11.84074	17.17	3.97	5.63	545.73	113.54
207	11.95684	12.07239	11.95769	11.95793	16.96	2.59	5.85	317.11	75.1
209	12.07403	12.18958	12.07488	12.07512	17.45	0.69	7.31	527.38	131.67
211	12.19122	12.30677	12.19207	12.19231	10.21	1.09	6.37	371.52	99.4
213	12.30841	12.42396	12.30926	12.3095	17.29	3.35	3.15	203.25	62.39
215	12.4256	12.54115	12.42645	12.42669	17.57	1.48	0.42	42.33	44.42
217	12.54279	12.65834	12.54364	12.54388	16.52	0.93	0	49.59	105.84
219	12.65998	12.77553	12.66083	12.66107	17.16	0.92	6.04	156.46	44.85
221	12.77717	12.89272	12.77802	12.77826	9.695	3.88	1.23	332.78	129.93
223	12.89436	13.00991	12.89521	12.89545	17.33	0.09	5.36	169.31	62.05
225	13.01155	13.1271	13.0124	13.01264	17.07	0.6	2.76	83.23	49.33
227	13.12874	13.24429	13.12959	13.12983	16.63	0.03	6.38	190.51	59.33
229	13.24593	13.36148	13.24678	13.24702	16.87	2.57	7.85	539.75	103.5
231	13.36312	13.47867	13.36397	13.36421	14.71	1.65	2.36	169.34	84.23
233	13.48031	13.59586	13.48116	13.4814	10.11	0.36	6.99	347.41	94.44
235	13.5975	13.71305	13.59835	13.59859	17.03	2.79	0.8	103.33	57.33
237	13.71469	13.83024	13.71554	13.71578	17.11	2.63	1.14	110.23	58.41
239	13.83188	13.94743	13.83273	13.83297	16.29	2.14	2.46	315.25	136.71
241	13.94907	14.06462	13.94992	13.95016	15.64	0.21	6.51	361.64	107.52
243	14.06626	14.18181	14.06711	14.06735	17.45	1.03	6.51	502.17	132.96
245	14.18345	14.299	14.1843	14.18454	16.94	3.45	7.18	432.21	81.27
247	14.30064	14.41619	14.30149	14.30173	16.73	0.34	2.15	83.61	66.76
249	14.41783	14.53338	14.41868	14.41892	16.33	2.83	1.83	248.99	106.57
251	14.53502	14.65057	14.53587	14.53611	17.03	3.45	6.99	731.67	139.95
253	14.65221	14.76776	14.65306	14.6533	16.53	1.17	6.75	226.17	57.04
255	14.7694	14.88495	14.77025	14.77049	16.25	2.57	0.32	104.99	72.24

Діагностика спряження cil_f

Кількість ВП= 125; Накоплений Логарифм ОП= 4256.237

Середнє значення ДП = 92.571; Середнє значення кута =16.426

Додаток Е

Програма синтезу методів прийняття рішення про стан ЦПГ
(Форма документу MathCad2000Pro)

$I := READPRN("1000f_is.txt")$ $N := READPRN("1000f_no.txt")$

Вхіднідані

$C0 := 0.099766926$ $C1 := 10$

$LnC0 := ln(C0)$ $LnC1 := ln(C1)$

$LnC0 = -2.305$ $LnC1 = 2.303$

$LnC := 0$ $Error_n := 0.001$

$Error_i := 0.01$

$MinI := min(I)$ $MaxN := max(N)$

$MinI = 3.675$ $MaxN = 26.87$

Виключення можливості ділення на 0

$Kol_obuch := 30$

$Kol_yach := 25$

$Raz_yach := 2.5$

$Max_znach := 100$

$Kol_expI := cols(I)$ $Kol_expN := cols(N)$

$MkolF_resh := 10$

$n := 0 .. Kol_obuch - 1$ Кількість рядків навчальної послідовності

$k := 0 .. Kol_expI - 1$ Кількість експериментів навчальної послідовності

Програма навчальної послідовності

Формування матриці навчальної послідовності по справному з"єднанні

```
Moi := | for m ∈ 0 .. Kol_obuch − 1
       |   for n ∈ 0 .. Kol_expI − 1
       |     o[m,n] ← I[m,n]
       | Moi ← o
```

Формування матриці навчальної послідовності по несправному з"єднанні

```
Mon := | for m ∈ 0 .. Kol_obuch − 1
       |   for n ∈ 0 .. Kol_expN − 1
       |     o[m,n] ← N[m,n]
       | Mon ← o
```

Визначення відношення правдоподібності

$\beta := 0.085$

$\alpha := 0.085$

$C11 := \frac{(1-\beta)}{\alpha}$

$C00 := \frac{\beta}{1-\alpha}$

$i := 1 .. Kol_yach$

$m := 0 .. Kol_yach - 1$

$I_i := äëèíà\left(I^{\langle 0 \rangle}\right)$ $kk_i := Raz_yach \cdot i$

$intervals := kk$ $I_n := äëèíà\left(N^{\langle 0 \rangle}\right)$

$M1 := hist(intervals, I)$ $A1 := hist(intervals, N)$

$C11 = 10.765$ $C00 = 0.093$

$k0 := \sum M1$ Сума елементів вектораM1 $k1 := \sum A1$

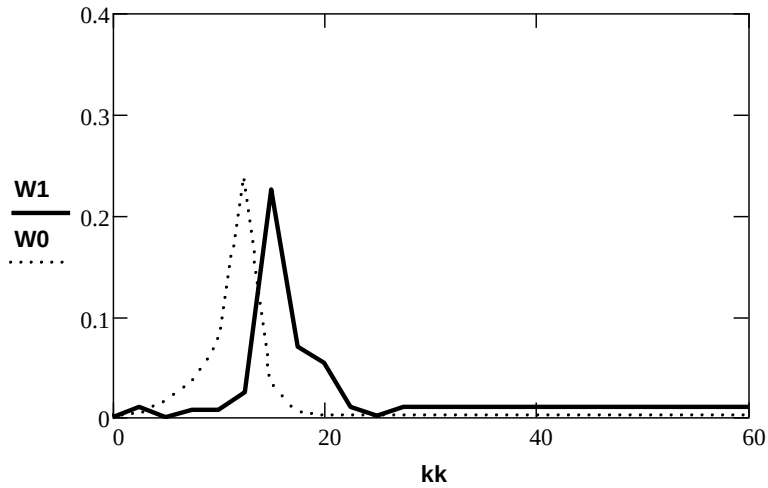
$W1 := \frac{A1}{Raz_yach \cdot k1}$

$ln(C11) = 2.376$ $ln(C00) = -2.376$

```
W1 := | W1 ← A1 / (Raz_yach·k1)
      | for m ∈ 0 .. rows(M1) − 1
      |   W1[m] ← Error_i  if  W1[m] = 0
      | W1
```

```
W0 := | W0 ← M1 / (Raz_yach·k0)
      | for m ∈ 0 .. rows(M1) − 1
      |   W0[m] ← Error_n  if  W0[m] = 0
      | W0
```

$$L := \overrightarrow{\left(\frac{W1}{W0}\right)} \qquad LnL := \overrightarrow{\ln(L)}$$



L =

	0
0	0.286
1	3.752
2	0.034
3	0.216
4	0.098
5	0.102
6	6.848
7	16.893
8	53.257
9	10.021
10	2.004
11	10
12	...

· M1 =

	0
0	0
1	11
2	69
3	137
4	300
5	981
6	136
7	17
8	0
9	0
10	0
11	0
12	...

Екзаменаційна програма

Формування матриці для екзаменаційної програми по справному з"єднанні

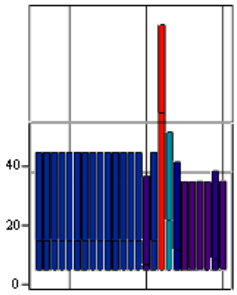
```
Mei := | for n ∈ 0 .. Kol_expl − 1
       |   for m ∈ Kol_obuch .. l_n − 1
       |     for k ∈ 0 .. l_i − Kol_obuch − 1
       |       e[m−Kol_obuch, n] ← l[m, n]
       | Mei ← e
```

Формування матриці для екзаменаційної програми по несправному з"єднанні

```
Men := | for n ∈ 0 .. Kol_expN − 1
       |   for m ∈ Kol_obuch .. l_n − 1
       |     for k ∈ 0 .. l_i − Kol_obuch − 1
       |       e[m−Kol_obuch, n] ← N[m, n]
       | Men ← e
```

Підпрограма порівнююча елементи екзаменуючої послідовності справного з"єднання з вектором Ln відношення правдоподібності і замінює ці елементи на відповідні логарифми для відповідних діапазонів розподілу

```
lni := | for n ∈ 0 .. Kol_expl − 1
       |   for m ∈ 0 .. l_i − Kol_obuch − 3
       |     for k ∈ 1 .. Kol_yach
       |       a[m, n] ← LnL[k−1]  if  kk[k−1] < Mei[m, n] ≤ kk[k]
       | ll ← a
```



L

B1 := lni

```
lnn := | for n ∈ 0 .. Kol_expN − 1
       |   for m ∈ 0 .. l_i − Kol_obuch − 3
       |     for k ∈ 1 .. Kol_yach
       |       a[m, n] ← LnL[k−1]  if  kk[k−1] < Men[m, n] ≤ kk[k]
       | ll ← a
```

$B2 := lnn$

Підпрограма,яка виконує порівняння значення Ln чисел матриці справного з"єднання з порогами,після порівняння,якщо число знаходиться між порогами вибирає наступне і сумує з попереднім і так до **MkolF_resh**,а після нього порівнює суму з 0.

```
End_i := | J ← Kol_expl − 1
         | I ← I_i − Kol_obuch − 3
         | for j ∈ 0 .. J
         |   for i ∈ 0 .. I
         |     | P[i,j] ← 0
         |     | K[i,j] ← B1[i,j]
         |     | E[i,j] ← 0
         | for j ∈ 0 .. J
         |   | d ← 0
         |   | for i ∈ 0 .. I
         |   |   | if K[i,j] ≤ LnC0
         |   |   |   | E[i,j] ← −1
         |   |   |   | K[i,j] ← B1[i,j]
         |   |   |   | P[i,j] ← 0
         |   |   |   | d ← 0
         |   |   | if K[i,j] ≥ LnC1
         |   |   |   | E[i,j] ← 1
         |   |   |   | K[i,j] ← B1[i,j]
         |   |   |   | P[i,j] ← 0
         |   |   |   | d ← 0
         |   |   | if LnC0 < K[i,j] < LnC1
         |   |   |   | E[i,j] ← 0
         |   |   |   | P[i,j] ← K[i,j]
         |   |   |   | P[i+1,j] ← P[i,j] + B1[i,j]
         |   |   |   | K[i+1,j] ← P[i,j] + B1[i,j]
         |   |   |   | P[i+1,j] ← P[i,j] + B1[i+1,j]  if i < I
         |   |   |   | K[i+1,j] ← P[i,j] + B1[i+1,j]  if i < I
         |   |   |   | d ← d + 1
         |   |   |   | if d = MkolF_resh
         |   |   |   |   | E[i,j] ← 1  if K[i,j] > 0
         |   |   |   |   | E[i,j] ← −1  if K[i,j] < 0
         |   |   |   |   | d ← 0
         | (E)
         | (P)
         | (K)
```

```
End_n := | J ← Kol_expN − 1
         | I ← I_n − Kol_obuch − 3
         | for j ∈ 0 .. J
         |   for i ∈ 0 .. I
         |     | P[i,j] ← 0
         |     | K[i,j] ← B2[i,j]
         |     | E[i,j] ← 0
         | for j ∈ 0 .. J
         |   | d ← 0
         |   | for i ∈ 0 .. I
         |   |   | if K[i,j] ≤ LnC0
         |   |   |   | E[i,j] ← −1
         |   |   |   | K[i,j] ← B2[i,j]
         |   |   |   | P[i,j] ← 0
         |   |   |   | d ← 0
         |   |   | if K[i,j] ≥ LnC1
         |   |   |   | E[i,j] ← 1
         |   |   |   | K[i,j] ← B2[i,j]
         |   |   |   | P[i,j] ← 0
         |   |   |   | d ← 0
         |   |   | if LnC0 < K[i,j] < LnC1
         |   |   |   | E[i,j] ← 0
         |   |   |   | P[i,j] ← K[i,j]
         |   |   |   | P[i+1,j] ← P[i,j] + B2[i,j]
         |   |   |   | K[i+1,j] ← P[i,j] + B2[i,j]
         |   |   |   | P[i+1,j] ← P[i,j] + B2[i+1,j]   if i < I
         |   |   |   | K[i+1,j] ← P[i,j] + B2[i+1,j]   if i < I
         |   |   |   | d ← d + 1
         |   |   |   | if d = MkolF_resh
         |   |   |   |   | E[i,j] ← 1   if K[i,j] > 0
         |   |   |   |   | E[i,j] ← −1   if K[i,j] < 0
         |   |   |   |   | d ← 0
         | (E)
         | (P)
         | (K)
```

Присвоєння вхідній матриці її значення та визначення коефіцієнта $\mathbf{Bi} := \mathbf{End_i}_0$

$$\alpha := \left| \begin{array}{l} \mathbf{J} \leftarrow \mathbf{Kol_expl} - 1 \\ \mathbf{l} \leftarrow \mathbf{l_i} - \mathbf{Kol_obuch} - 3 \\ \mathbf{d} \leftarrow 0 \\ \mathbf{t} \leftarrow 0 \\ \text{for } \mathbf{j} \in 0 .. \mathbf{J} \\ \quad \text{for } \mathbf{i} \in 0 .. \mathbf{l} \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} \mathbf{d} \leftarrow \mathbf{d} + 1 \quad \text{if } \mathbf{Bi}_{\mathbf{i},\mathbf{j}} < 0 \\ \mathbf{t} \leftarrow \mathbf{t} + 1 \quad \text{if } \mathbf{Bi}_{\mathbf{i},\mathbf{j}} > 0 \end{array} \right. \\ \mathbf{k} \leftarrow \mathbf{t} + \mathbf{d} \\ \alpha \leftarrow \dfrac{\mathbf{t}}{\mathbf{k}} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{k} \\ \alpha \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} 2 \\ 257 \\ 7.782 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Присвоєння вхідній матриці її значення та визначення коефіцієнта $\mathbf{Bn} := \mathbf{End_n}_0$

$$\beta := \left| \begin{array}{l} \mathbf{J} \leftarrow \mathbf{Kol_expN} - 1 \\ \mathbf{l} \leftarrow \mathbf{l_n} - \mathbf{Kol_obuch} - 3 \\ \mathbf{d} \leftarrow 0 \\ \mathbf{t} \leftarrow 0 \\ \text{for } \mathbf{j} \in 0 .. \mathbf{J} \\ \quad \text{for } \mathbf{i} \in 0 .. \mathbf{l} \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} \mathbf{d} \leftarrow \mathbf{d} + 1 \quad \text{if } \mathbf{Bn}_{\mathbf{i},\mathbf{j}} < 0 \\ \mathbf{t} \leftarrow \mathbf{t} + 1 \quad \text{if } \mathbf{Bn}_{\mathbf{i},\mathbf{j}} > 0 \end{array} \right. \\ \mathbf{k} \leftarrow \mathbf{t} + \mathbf{d} \\ \beta \leftarrow \dfrac{\mathbf{d}}{\mathbf{k}} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{k} \\ \beta \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

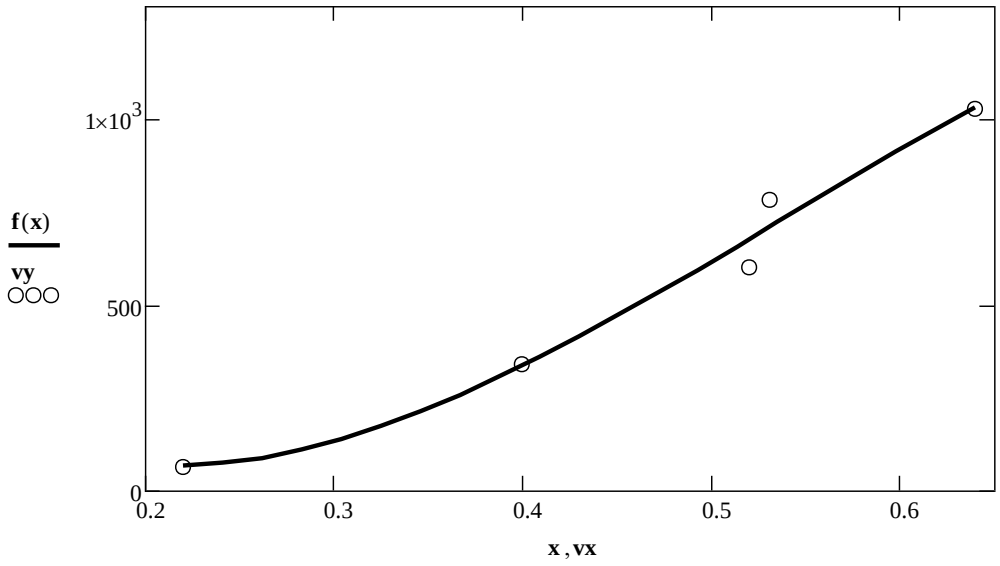
$$\beta = \begin{pmatrix} 7 \\ 349 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

Додаток Ж

Програма визначення залишкового ресурсу дизельного двигуна (Форма документу MathCad2010Pro)

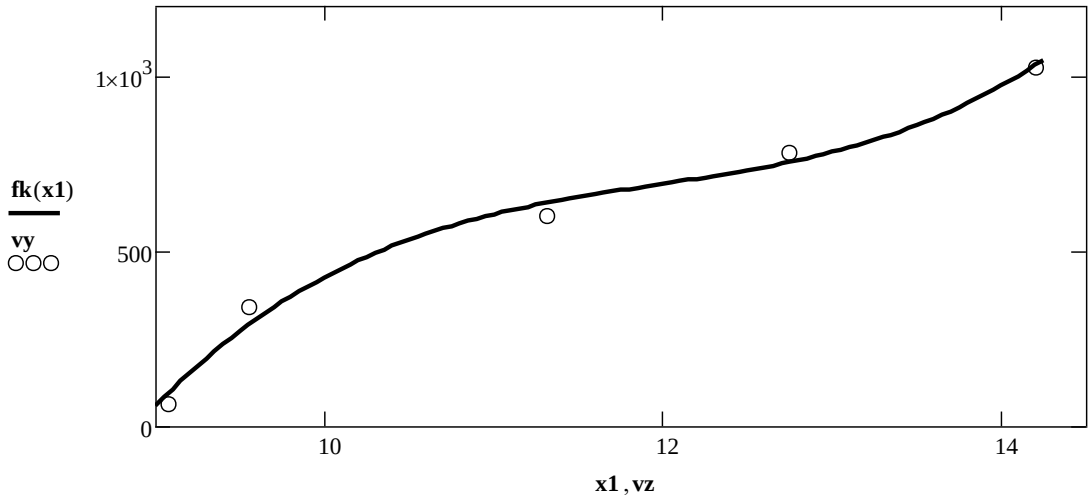
$$\mathbf{vy} := \begin{pmatrix} 65 \\ 340 \\ 600 \\ 780 \\ 1025 \end{pmatrix} \quad \mathbf{vx} := \begin{pmatrix} 0.22 \\ 0.40 \\ 0.52 \\ 0.5313 \\ 0.64 \end{pmatrix} \quad \mathbf{r} := \mathbf{regress}(\mathbf{vx}, \mathbf{vy}, 3) \qquad \mathbf{vz} := \begin{pmatrix} 9.08 \\ 9.551 \\ 11.32 \\ 12.75 \\ 14.202 \end{pmatrix} \quad \mathbf{k} := \mathbf{regress}(\mathbf{vz}, \mathbf{vy}, 3)$$

$$\mathbf{x} := 0.22, 0.241 .. 0.64 \qquad \mathbf{f}(\mathbf{x}) := \mathbf{r}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-1} \cdot \mathbf{x}^3 + \mathbf{r}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-2} \cdot \mathbf{x}^2 + \mathbf{r}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-3} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{r}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-4}$$



$$\mathbf{x1} := 9, 9.05 .. 14.25$$

$$\mathbf{fk}(\mathbf{x1}) := \mathbf{k}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-1} \cdot \mathbf{x1}^3 + \mathbf{k}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-2} \cdot \mathbf{x1}^2 + \mathbf{k}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-3} \cdot \mathbf{x1} + \mathbf{k}_{\mathbf{rows}(\mathbf{r})-4}$$



$S(x1) := -0.525 + 0.082 \cdot x1$ Рівняння залежності зазору від фази

$fk(x1) := k_{rows(r)-1} \cdot x1^3 + k_{rows(r)-2} \cdot x1^2 + k_{rows(r)-3} \cdot x1 + k_{rows(r)-4}$

$WRITEPRN(\text{"f(x).txt"}) := fk(x1)$

$Tsr := READPRN(\text{"f(x).txt"})$

$WRITEPRN(\text{"S(f).txt"}) := S(x1)$

$S := READPRN(\text{"S(f).txt"})$

$WRITEPRN(\text{"x.txt"}) := x1$

$\Phi := READPRN(\text{"x.txt"})$

$i := 0 .. rows(Tsr) - 1$

$S_{rows(Tsr)-1} = 0.6435$

$\nu := 0.112925$

$\sigma_i := \nu \cdot Tsr_i$

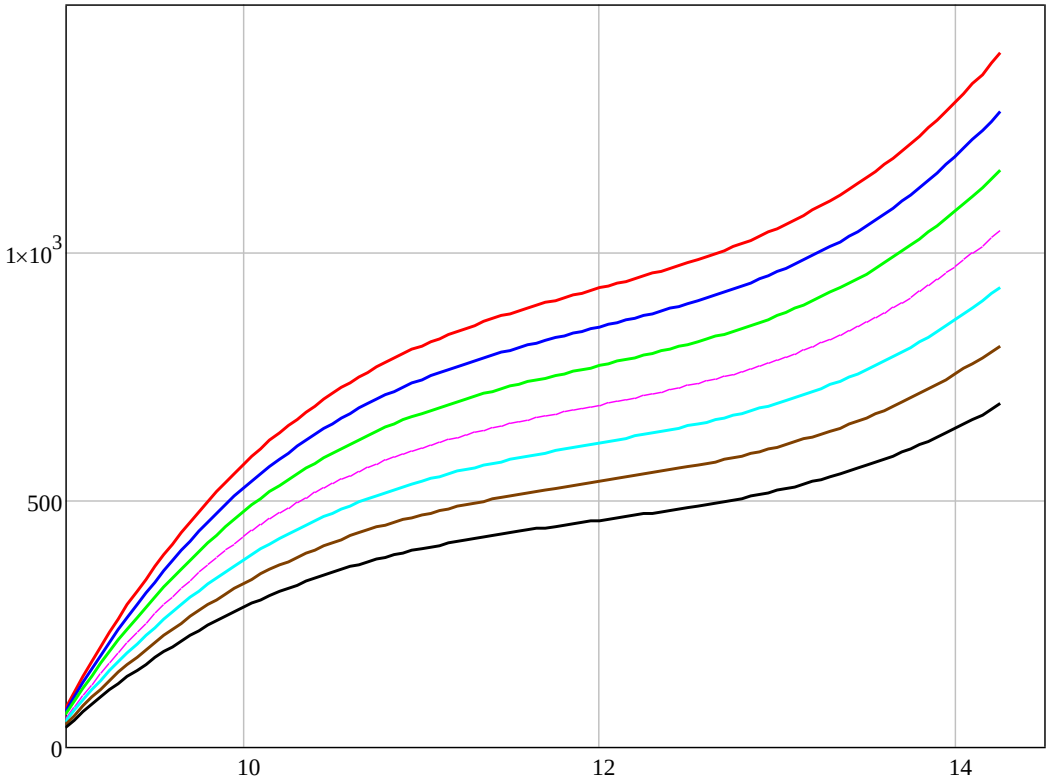
$K3\sigma := SK^{\langle 0 \rangle}$ $K_\sigma := SK^{\langle 4 \rangle}$

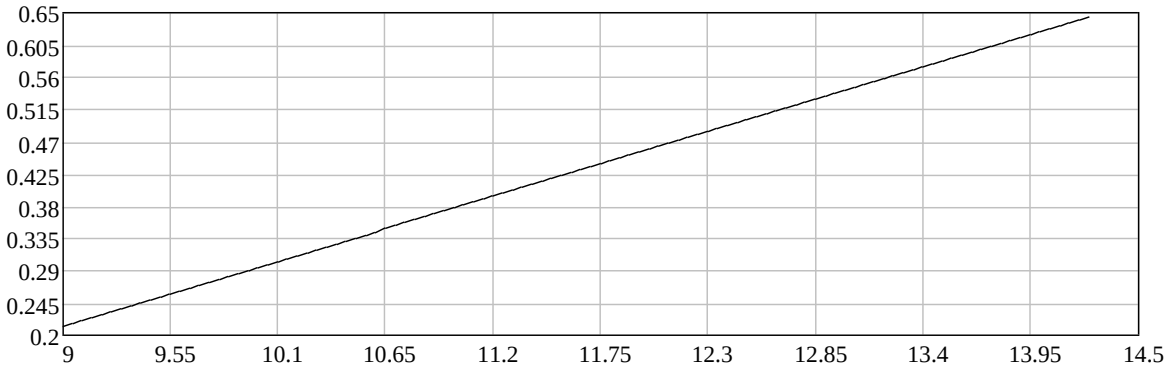
$K2\sigma := SK^{\langle 1 \rangle}$ $K_2\sigma := SK^{\langle 5 \rangle}$

$K\sigma := SK^{\langle 2 \rangle}$ $K_3\sigma := SK^{\langle 6 \rangle}$

$Kn := SK^{\langle 3 \rangle}$

```
SK := | Tsr ← Tsr
      | for j ∈ 0 .. 6
      |   for i ∈ 0 .. rows(Tsr) − 1
      |     | σ[i,j] ← Tsr[i]·ν
      |     | SK[i,j] ← Tsr[i] + [3·σ[i,j] − j·(σ)[i,j]]
      | SK
```





$\mathbf{WRITEPRN}(\text{"SK.txt"}) := \mathbf{SK}$

Програма визначення індивідуального
Прогнозу залишкового ресурсу ЦПГ

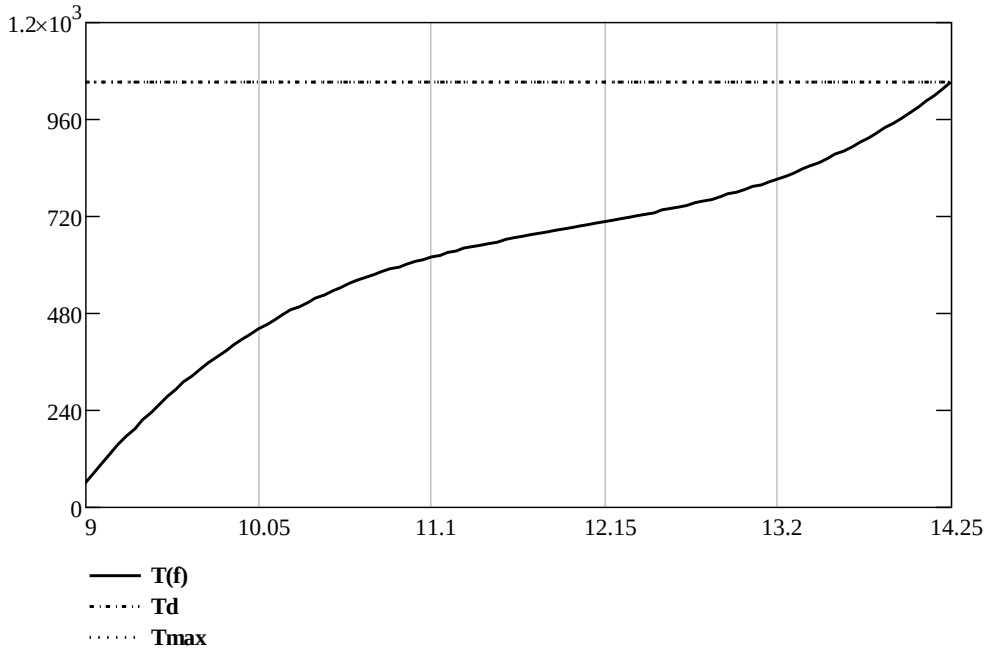
Дані діагностування

$\mathbf{Td} := 1050$ $\mathbf{Faza} := 14.25$

$$
\mathbf{Rizults} := \left|
\begin{array}{l}
\mathbf{Razbros} \leftarrow \overrightarrow{\left|\left(\vec{\Phi} - \mathbf{Faza}\right)\right|} \\
\mathbf{i} \leftarrow 0 \\
\mathbf{Rmin} \leftarrow \mathbf{min}(\mathbf{Razbros}) \\
\mathbf{while}\ \mathbf{Razbros}_{\mathbf{i}} > \mathbf{Rmin} \\
\quad \left|
\begin{array}{l}
\mathbf{i} \leftarrow \mathbf{i} + 1 \\
\mathbf{i}
\end{array}
\right. \\
\mathbf{kz} \leftarrow \dfrac{\mathbf{Tsr}_{\mathbf{i}}}{\mathbf{Td}} \\
\mathbf{h} \leftarrow (-0.525 + 0.082 \cdot \mathbf{Faza}) \\
\mathbf{for}\ \ \mathbf{i} \in 0 .. \mathbf{rows}(\mathbf{Tsr}) - 1 \\
\quad \mathbf{D}_{\mathbf{i}} \leftarrow \dfrac{\mathbf{Tsr}_{\mathbf{i}}}{\mathbf{kz}} \\
\mathbf{Zr_mean} \leftarrow \mathbf{D}_{\mathbf{rows}(\mathbf{D})-1} - \mathbf{Td} \\
\sigma \leftarrow \nu \cdot \mathbf{Tsr}_{\mathbf{rows}(\mathbf{Tsr})-1} \\
\mathbf{Zr_min} \leftarrow \mathbf{Zr_mean} - 3 \cdot \sigma \\
\mathbf{Zr_max} \leftarrow \mathbf{Zr_mean} + 3 \cdot \sigma \\
\begin{pmatrix}
\mathbf{h} & \text{"Zazor(CPG)"} \\
\mathbf{kz} & \text{"Intens_znoshuvanya"} \\
\mathbf{Zr_min} & \text{"Min_zal_resurs"} \\
\mathbf{Zr_mean} & \text{"Mean_zal_resurs"} \\
\mathbf{Zr_max} & \text{"Max_zal_resurs"} \\
\mathbf{D} & \text{"Individual_zakon_rozpodilu"}
\end{pmatrix}
\end{array}
\right.
$$

Результат:

$$\mathbf{Rizults} = \begin{pmatrix} 0.6435 & \text{"Zazor(CPG)"} \\ 0.99714 & \text{"Intens_znoshuvanya"} \\ -354.69742 & \text{"Min_zal_resurs"} \\ 0 & \text{"Mean_zal_resurs"} \\ 354.69742 & \text{"Max_zal_resurs"} \\ \mathbf{\{106,1\}} & \text{"Individual_zakon_rozpodilu"} \end{pmatrix}$$



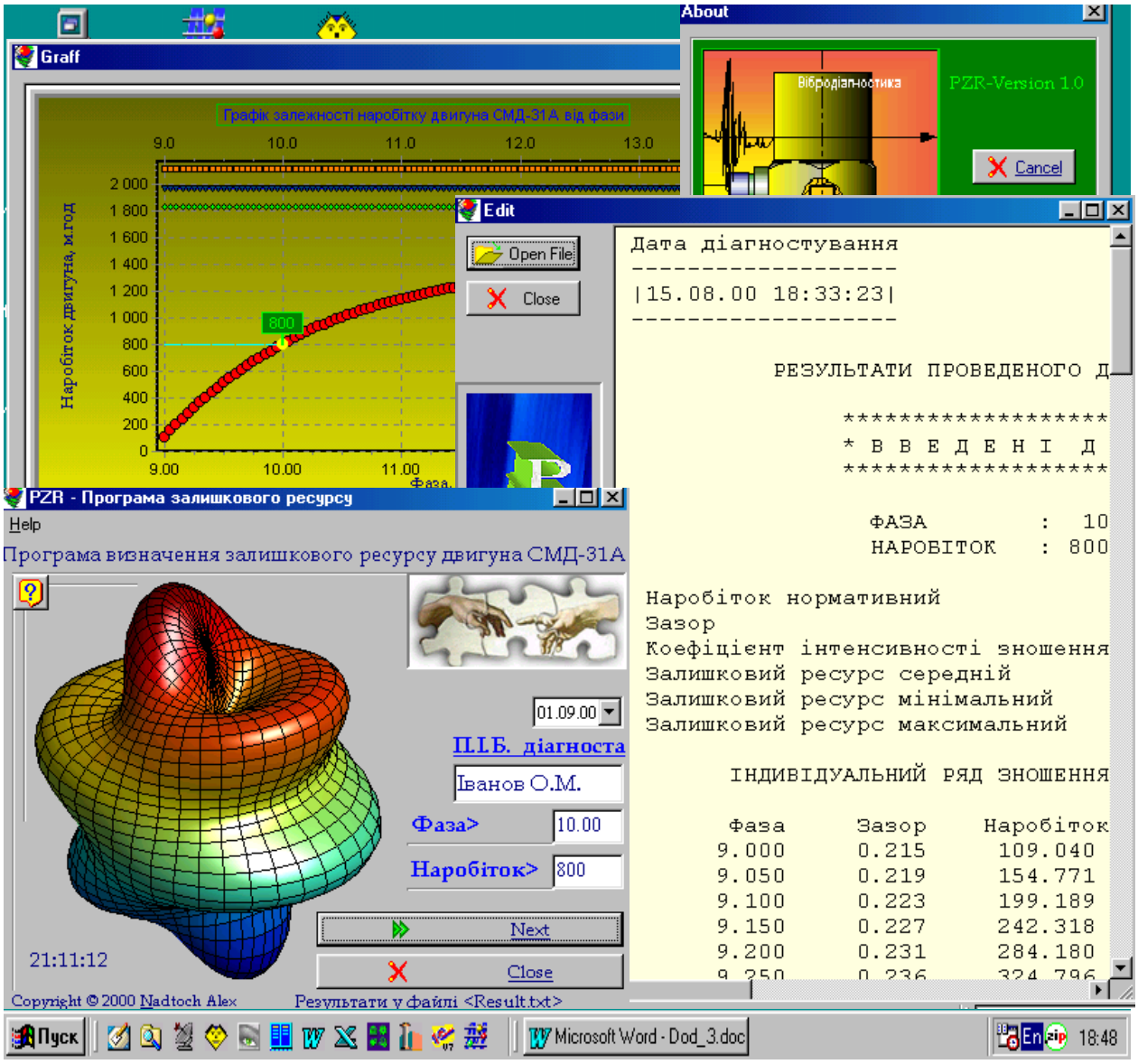
$\left(\mathbf{Rizults}^{\langle 0 \rangle}\right)_5 =$

	0
0	58.11605
1	82.51576
2	106.20344
3	129.26934
4	151.53295
5	173.19484
6	194.25501
7	214.61318
8	234.36963
9	253.52436
10	272.07736
11	290.02865
12	...

Числові значення індивідуального закону розподілу наробітку.

Додаток 3

Загальний вигляд програми визначення залишкового ресурсу дизельних енергетичних установок за параметром фази віброударного посилання.



Додаток И

Результати розрахунку фази виникнення віброакустичного посилання в залежності від швидкісного режиму роботи двигуна та зазору в ЦПГ

Зазор, мм	Фаза віброудару при обертах двигуна					
	750	1000	1250	1500	1750	2000
0.22	7.6769	7.0533	6.4859	5.9966	5.5904	5.2453
0.26	8.4249	7.7327	7.0936	6.555	6.1032	5.7236
0.30	9.1345	8.3645	7.661	7.0715	6.5805	6.1685
0.34	9.801	8.9588	8.1954	7.5578	7.0295	6.5856
0.38	10.4289	9.5182	8.7005	8.0182	7.4519	6.9798
0.42	11.0307	10.0558	9.1857	8.4586	7.8577	7.3561
0.46	11.6191	10.5754	9.6488	8.8795	8.2454	7.7163
0.50	12.1754	11.0702	10.0956	9.2843	8.6175	8.0621
0.54	12.7208	11.5514	10.5256	9.6765	8.9771	8.3958
0.58	13.2462	12.021	10.944	10.0559	9.3249	8.7184
0.62	13.7533	12.4736	11.3507	10.4233	9.6625	9.031
0.66	14.2546	12.9148	11.7422	10.778	9.9874	9.3325
0.70	14.7436	13.3477	12.1273	11.1263	10.3063	9.6277
0.74	15.221	13.7694	12.5037	11.4662	10.6175	9.9152
0.78	15.6882	14.1825	12.8714	11.798	10.9212	10.1964
0.82	16.1481	14.5858	13.2299	12.1225	11.2177	10.4708

Додаток К

Масиви фази та відносної амплітуди віброударного імпульсу викликаного перекладкою поршня.

Значення масивів фази

Значення фази для циліндрів із зазором < 0.62 мм												
Значення зазору в циліндрі, мм												
0.47	0.53	0.54	0.49	0.48	0.53	0.59	0.49	0.46	0.55	0.47	0.51	0,59
Номер експерименту												
S303	S314	S329	S334	S341	S350	S358	S364	S371	S380	S388	S406	S697
12.47	12.69	13.69	12.46	11.89	13.47	14.76	10.845	13.08	13.73	13.16	14.35	13.08
13.06	12.3	13.45	12.78	12.83	13.25	14.49	14.95	9.845	14.65	13.52	14.28	15.36
12.94	12.41	13.45	12.34	12.35	13.2	12.65	14.04	12.94	10.845	12.21	13.32	15.36
12.76	12.53	12.8	12.62	10.845	13.26	12.56	14.18	13.41	14.31	10.845	10.845	10.37
9.845	9.845	9.245	12.09	15.38	13.32	15.05	14.22	12.53	14.75	12.36	15.44	14.14
12.1	11.845	9.984	10.845	12.04	10.845	10.845	9.845	13.17	14.4	13.55	14.42	11.71
11.57	12.49	13	10	10.845	12.49	15.16	12.67	10.98	11.8	13.04	13.18	10.845
12.49	12.55	12.97	9.9	15.08	16.6	10.845	13.55	13.13	13.29	12.78	15.64	14.97
12.13	12.68	12.96	12.82	12.42	12.845	9.552	9.711	10.845	10.87	12.67	13.69	15.09
11.82	12.62	12.7	12.42	12.69	13.11	14.28	14.38	12.5	14.49	10.845	14.01	14.2
12.99	12.75	12.37	13.12	12.26	12.59	12.39	13.5	12.68	16.63	11.79	13.41	14.72
12.21	12.44	15.66	12.62	12.04	12.97	12.845	13.84	13.44	13.84	13.26	14.73	14.42
11.65	12.67	16.15	12.63	12.81	10.845	14.9	13.91	13.18	15.26	12.57	14.45	10.66
12.3	12.15	12.78	16.16	12.82	13.21	14.71	10.2	13.46	13.845	13.28	15.79	9.782
10.845	9.295	12.53	15.14	12.4	12.49	14.49	13.64	9.809	14.5	12.46	13.29	15.57
12.28	12.54	13.18	9.92	12.14	13.03	10.845	14.16	13.46	9.845	13.9	13.55	14.87
12.55	12.89	12.7	15.26	12.07	13.28	12.845	13.97	13.64	13.5	14.17	13.93	14.12
12.63	12.39	12.27	13.16	15.28	13.03	14.06	10.845	10.845	14.28	9.245	9.845	10.845
12.41	16.95	12.88	12.54	11.96	13.18	14.02	13.31	14.11	12.75	10.72	9.611	14.73
11.69	12.36	12.58	12.81	11.98	13.07	14.06	14.26	10.845	13.82	13.4	9.245	14.34
16.1	12.17	12.31	13.16	12.68	13.26	14.88	13.66	15.02	9.845	13.86	14.44	14.81
12.94	12.53	12.96	12.38	9.845	13.33	13.92	14.23	9.245	14.79	12.29	14.62	14.05

12.63	15.23	10.15	12.88	10.845	10.845	14.65	10.845	13.55	14.17	11.89	14.33	15.6
14.4	12.23	16.16	11.37	12.2	13.1	12.07	13.66	13.02	14.76	13.15	14.81	15.23
12.54	12.6	13.01	12.55	12.79	12.5	14.12	13.94	13.81	10.845	13.61	14.21	14.36
11.64	12.91	12.29	12.69	12.7	13.3	9.345	10.845	13.88	14.81	13.36	9.245	14.2
13.12	12.7	12.76	13.55	12.63	13.4	14.47	10.845	13.05	13.79	13.27	13.39	15.39
12.03	12.67	13.05	10.8	12.72	12.91	11.845	13.9	14.65	15.3	12.32	14.08	14.17
12.02	12.3	12.23	10.04	12.27	13.82	14.18	9.591	12.88	14.6	10.16	14.55	14.48
12.94	15.8	12.86	12.87	12.29	14.09	13.9	14.02	10.67	14.82	13.16	13.44	11.87
11.87	13.2	15.69	12.69	16.16	13.81	13.73	14.99	12.87	10.845	14.29	14.69	9.992
11.94	12.71	13.11	13.42	12.53	12.89	11.25	14.18	13.46	10.845	9.245	13	13.44
13.17	12.98	13.06	15.67	12.15	13.43	14.82	9.845	12.82	13.86	9.245	13.05	14.65
11.62	12.9	10.845	12.45	11.89	13.67	11.92	13.45	13.81	14.79	13	14.54	10.845
11.845	13.94	12.88	13.14	12.8	13.35	10.845	14.63	10.76	14.84	13.28	13.7	15.4
12.23	12.78	9.784	14.34	10.345	13.32	14.44	13.41	12.51	10.18	13.64	13.72	15.09
11.73	10.345	13.14	13.11	10.845	13.39	14.12	14.46	10.845	14.53	13.45	13.87	14.7
13.38	12.85	13.48	12.14	12.56	13.5	12.845	13.69	13.35	14.65	14.05	13.67	10.845
13.72	12.29	13.1	12.5	11.86	13.34	14.57	14.19	9.879	14.06	13.21	13.36	11.15
9.44	15.23	13.12	13.22	12.12	13.06	14.03	10.845	13.51	10.58	14.09	13.51	13.77
11.43	15.84	12.97	12.7	12.26	16.49	13.58	13.9	14.13	10.03	10.845	14.01	10.92
11.87	14.75	16.03	13.04	12.46	12.48	14.19	13.85	12.96	14.7	9.245	14.54	10.845
13.92	12.59	12.92	16.16	12.26	11.845	10.11	10.845	13.11	14.09	13.49	12.9	15.29
12.51	12.67	15.47	12.55	10.845	12.92	12.845	14.65	13	14.43	9.825	10.55	14.79
12.97	12.32	12.72	12.27	12.49	13.61	11.72	14.03	13	13.98	13.22	14.47	15.59
12.99	9.245	13.42	12.28	9.845	12.55	13.65	10.845	16.58	15.99	12.74	13.91	10.845
11.88	14.26	12.59	13.5	11.84	12.96	14.37	13.85	12.79	14.64	12.19	9.291	15.17
13.32	12.87	12.31	12.67	12.56	13.41	14.46	14.07	13.29	13.74	13.24	14.56	14.78
14.23	14.5	15.57	13.57	12.62	13.63	14.09	14.81	10.845	10.48	12.75	11.62	15.25
13.4	12.7	12.37	13.04	12.6	16.52	13.89	9.351	12.92	14.71	12.55	13.92	16
9.845	14.22	10.845	13.14	10.9	12.64	14.58	9.845	12.94	14.27	15.56	14.19	11.69
10.345	13.11	13.07	13.13	12.52	12.93	11.19	9.471	11.845	9.978	13.64	10.845	15.05
13.05	12.96	13.14	13.09	16.1	12.85	11.59	14.51	13.66	10.845	13.65	13.53	14.3
12.84	12.95	16.37	11.16	16.77	12.76	14.36	12.19	13.21	14.26	16.64	13.69	15.87

13.11	12.42	16.52	13.34	12.25	12.81	13.81	13.39	9.845	14.87	13.06	13.72	15.21
12.12	12.06	13.07	9.845	11.92	12.54	15.12	10.845	13.13	14.6	16.4	14.42	14.72
12.29	12.53	13.02	9.68	12	12.81	14.69	14.25	13.34	13.65	13.33	13.99	10.845
13.25	16.41	12.99	12.38	11.95	13.25	14.89	13.72	16.82	14.56	12.74	10.845	14.53
13.22	13.03	12.8	9.845	12.59	13.63	10.845	14.18	9.245	14.3	13	13.55	15.39
12	12.31	14.09	12.32	12.59	13.35	14.65	9.861	10.845	14.96	12.75	10.27	10.47
13.08	12.36	10	9.245	13.11	13.72	10.76	13.72	13.03	15.33	12.79	14.13	14.98
11.91	12.5	12.57	9.97	12.7	12.81	14.33	9.845	13.12	11.845	13.18	10.845	9.452
12.22	12.19	15.47	13.33	12.19	13.58	14.44	14.21	10.845	10.45	13.05	13.33	12.08
12.84	14.5	12.25	12.93	12.61	13.11	14.14	11.39	13.02	9.023	15.6	9.245	9.512
12.62	12.98	10.845	13.07	12.32	9.384	15.06	14.31	16.82	11.94	12.52	13.78	15.02
13.22	14.61	13.37	9.95	12.46	13.5	10.845	11.09	10.73	13.86	14.98	14.21	15.88
11.03	10.845	13.67	9.75	12.08	13.56	15	14.2	13.88	10.845	13.24	13.92	15.65
12.25	9.615	9.884	13.12	12.41	12.66	10.73	11.68	10.21	13.74	9.065	13.66	14.66
14.32	12.21	15.43	12.24	12.47	12.55	14.93	13.77	12.96	14.5	14.67	11.92	10.845
12.81	14.84	13.18	13.1	14.84	13.79	11.89	9.845	13.28	9.074	12.96	13.28	14.94
10.845	12.71	13.2	13.06	12.53	13.65	13.9	14.54	11.01	14.31	13.57	13.47	9.592
10.96	12.58	13.56	12.56	12.26	13.48	14.12	14.01	12.87	12.09	13.25	14.09	14.22
10.845	14.97	13.87	12.26	10.845	10.845	13.98	13.91	13.03	11.61	12.32	14.19	10.845
12.51	12.27	12.34	13	12.27	12.85	9.935	10.845	12.99	13.91	10.845	14.27	15.26
12.11	12.21	12.49	12.95	11.87	13.07	14.4	9.671	13.42	13.78	12.66	14.82	14.3
14.2	14.64	12.97	13.11	11.845	13.14	13.55	11.61	14.21	14.23	13.06	10.845	14.98
11.67	12.99	12.96	13.2	12.09	12.86	14.38	14.09	11.845	11.69	13.89	13.92	14.07
12.23	13.37	13.32	13.27	12.01	12.83	14.67	9.021	13.38	12.95	13.01	14.36	10.845
14.53	12.26	13.29	13.55	11.83	12.88	13.97	13.44	10.33	14.86	15.18	13.37	14.99
12.53	14.01	12.35	13.68	12.63	13.08	14.52	13.92	13.17	11.64	12.72	13.45	14.89
12.12	12.88	12.97	12.44	12.43	16.79	11.845	14.66	13.22	10.07	12.78	12.57	14.4
13.48	11.845	15.35	14.16	12.59	13.15	14.45	14.15	13.2	11.95	12.85	9.245	14.72
15.34	12.47	13.21	12.81	15.06	13.25	10.845	14.37	9.245	11.36	15.43	13.32	15.98
12.3	14.13	12.53	13.13	12.18	10.845	14.07	14	13.95	14.3	13.89	10.91	15.51
11.68	12.77	13.06	13.29	15.7	12.95	14.82	14.22	13.15	10.73	15.4	14.1	10.845
11.76	12.68	13.4	10.8	12.54	12.74	14.27	11.51	13.5	13.85	12.55	14.42	14.88

12.04	13.41	13.27	13.12	12.21	12.9	13.57	13.845	12.78	15.33	12.96	13.97	15.9
14.42	12.79	13.05	12.61	12.42	13.2	10.96	14.6	12.41	14.44	13.16	13.86	15.03
10.86	12.39	13.15	9.245	10.845	13.25	13.9	13.78	13.35	11.845	9.845	13.33	15.91
11.76	13.49	12.6	9.61	12.59	13.15	10.845	11.55	10.845	11.4	13.48	13.97	13.45
12.12	15.26	13.38	12.36	9.236	13.44	14.32	14.08	14.63	14.22	13.08	10.845	15.28
13.34	12.26	13.31	14.17	12.77	12.91	14.17	10.845	9.245	12.29	15.18	14.11	15.06
12.93	12.75	13.21	12.97	14.75	13.28	14.63	13.73	12.87	15	12.33	14.47	9.732
12.45	12.05	13.42	13.15	15.14	10.845	14.09	13.46	13.36	14.71	13.18	9.083	11.36
14.48	13.29	12.52	15.32	12.2	12.76	14.28	11.14	14.3	11.76	10.845	9.845	14.26
11.96	12.6	12.93	13.21	14.19	13.1	14.31	13.85	12.95	14.28	13.54	13.44	15.09
12.11	14.62	12.33	12.97	12.48	10.845	15.06	10.02	12.82	11.845	10.24	14.17	15.31
13.58	13.23	13.49	15.5	13.23	12.77	14.65	14.07	13.38	14.63	12.79	13.78	10.33
13.5	11.89	12.83	11.9	12.36	13.43	13.845	14.42	12.93	14.36	13.55	9.134	14.52
10.96	12.6	13.31	13.74	12.16	12.98	14.09	13.86	9.845	14.41	12.57	14	14.6
11.38	12.74	13.41	15.14	12.27	13.1	14.91	14.06	9.589	9.12	13.18	9.27	10.845
12.24	12.57	13.44	10.845	13.76	14.5	14.77	9.845	12.47	9.958	10.845	12.83	15.21
12.86	12.72	12.96	13.14	14.66	13.27	14.61	10.845	12.88	12.845	10.845	10.845	10.845
12.07	13.44	13.15	12.44	9.845	12.76	16.35	14.56	10.845	9.845	13.03	14.49	15.37
12.44	11.37	12.63	13.2	10.845	10.845	10.92	14	9.845	9.845	12.46	13.76	14.77
10.75	11.57	13.21	9.71	13.18	12.71	14.4	13.39	13.6	15.08	15.16	14.11	15.81
11.92	12.67	12.6	12.39	12.63	10.845	14.13	13.8	10.39	10.845	13.88	10.845	15.79
12.24	12.5	12.86	12.24	12.82	12.86	13.74	14.11	13.98	15.33	13.52	14.53	15.58
11.64	10.845	9.494	13.04	9.736	12.87	9.945	9.911	10.845	10.68	13.26	14.44	10.845
12.06	12.83	12.92	16.34	12.5	13	14.36	13.89	13.31	14.67	13.01	13.89	15.08
11.9	12.05	12.845	13.14	12.61	12.66	10.29	9.531	12.02	11.77	13.18	9.245	10.845
13.3	12.8	12.86	13.14	13.43	13.42	10.35	14.69	10.85	10.845	14.33	14.04	10.845
14.87	14.14	12.99	14.54	12.32	13.71	14.68	13.08	12.71	13.4	12.98	9.113	15.53
11.86	12.32	13.3	14.94	12.68	13.08	9.485	14.06	12.97	11.845	9.245	14.33	15.33
11.86	12.55	16.81	13.26	15.37	10.845	14.86	14.27	13.29	12.05	13.8	14.04	15.82
12.8	12.54	12.98	13.04	12.26	13	10.845	14.16	12.84	13.19	13.17	13.42	15.54
12.06	12.78	12.79	12.84	13	13.78	14.8	13.53	13.05	13.92	12.29	10.845	15.22
13.84	14.99	13.41	12.44	12.45	13.5	14.78	13.83	9.369	13.66	9.245	14.11	15.33

12.48	12.77	12.85	14.64	12.12	13.02	15.01	10.845	13.32	14.52	13.44	14.07	10.845
12.49	12.05	12.96	12.44	15.15	12.91	14.35	9.845	9.845	14.11	13.87	9.845	10.55
12.71	12.67	12.78	12.74	13.98	13.25	11.15	14.06	12.94	11.76	11.845	15.09	15.33
12.53	12.15	12.91	10.845	10.845	13.64	15	14.13	9.245	13.52	11.43	10.845	12.3
12.54	12.67	12.59	10.845	12.87	12.89	14.98	10.52	13.29	12.97	12.42	12.85	15.97
12.37	13.26	11.45	12.94	13.92	12.78	14.76	13.78	12.5	11.72	13.53	14.07	15.42
13.6	12.68	12.08	12.71	12.08	13.22	14.01	13.82	13.62	14.4	13.49	14.14	16.28
11.7	13.14	10.03	12.34	12.6	13.43	14.94	13.87	10.26	14.33	9.845	9.245	11.5
11.65	13.07	12.97	9.96	12.19	10.845	9.845	14.47	13.59	10.845	13.2	12.49	16.32
Середні значення												
12.4788	12.8351	12.9639	12.6687	12.6299	12.8719	13.4591	12.8951	12.382	12.6747	12.8763	12.7951	13.8552

Значення фази для циліндрів із зазором > 0.62 мм										
Значення зазору в циліндрі, мм										
0.82	0.82	0.81	1.09	0.82	1.13	1.13	0.82	0.82	0.82	0,81
Номер эксперименту										
S608	S12	S634	S693	S701	S717	S721	S729	S862	S878	S890
14.76	16.83	15.51	19.46	16.67	19.89	20.09	17.85	16.32	16.92	14.63
17.34	21.57	16.1	18.54	16.99	22.98	20.85	16.43	16.21	16.36	16.09
19.52	17.06	15.65	19.18	16.14	20.33	20.58	17.79	17.02	16.79	16.29
16.88	16.91	16.11	19.43	16.78	19.45	19.81	17.04	16.23	17.1	16.93
16.7	16.53	15.76	19.05	16.08	23.09	20.08	17.12	18.9	16.12	16.68
10.37	16.86	16.31	25.71	15.89	20.48	21.14	17.24	16.99	16.94	16.98
16.42	16.56	13.84	18.93	17.11	19.23	21.5	16.76	16.91	16.22	16.5
9.817	16.92	16.08	18.95	10.09	18.65	21.27	16.86	16.68	13.84	16.68
16.92	15.68	16.17	23.3	9.6	19.96	20.47	13.79	16.87	16.62	16.83
17.29	16.94	15.94	19.94	16.49	20.54	20.37	17.42	16.44	17.06	16.17
16.99	17.14	16.2	18.93	9.8	21.91	20.25	16.66	17.24	17	16.13
16.54	10.34	15.65	19.07	16.41	20.71	19.88	15.13	17.1	16.94	16.41
9.607	15.74	15.3	19.71	17.02	12.98	20.14	16.93	16.55	16.29	6.461
16.45	10.09	15.4	18.65	14.21	22.4	15.76	16.34	16.51	16.37	16.85
16.8	22.57	15.46	18.92	17.41	25.49	21.76	7.615	16.28	16.58	16.23

19.21	10.24	15.65	20.67	15.79	20.5	21.2	16.82	16.97	16.31	16.11
21.62	17.21	15.68	19.28	16.31	21.63	19.92	16.53	16.14	17.22	15.43
16.41	16.79	15.7	24.41	17.07	20.25	23.67	16.81	16.15	16.39	17
16.67	16.76	15.58	20.29	16.91	21.81	20.16	17.41	16.5	16.57	13.67
16.28	17.4	16.25	18.96	12.9	21.25	19.34	17.33	17.13	16.47	16.01
17.08	16.79	15.7	19.47	15.37	18.93	25.8	17.05	16.79	16.43	16.98
17.04	16.3	15.69	19.01	16.29	19.06	14.66	16.49	16.67	17.33	16.51
16.32	16.14	16.6	20.03	16.21	19.67	20.48	17.35	16.74	16	16.52
17.27	17.14	18.72	19.23	15.98	20.3	21.16	19.79	16.55	15.98	14.47
16.3	16.65	12.94	19.42	16.87	20.42	19.39	16.88	16.82	16.72	16.34
16.39	13.45	12.06	19.18	16.5	19.85	20.46	17.09	16.17	17.29	16.74
15.9	23.35	17.62	18.87	21.56	19.79	19.83	16.86	16.49	17.2	16.07
16.44	18.81	14.94	19.37	14.12	19.71	20.31	18.97	16.95	13.64	16.64
16.56	16.28	12.45	22.54	13.69	20.15	21.8	16.99	17.01	15.76	17.1
16.37	16.32	13.75	20.07	9.96	20.95	20.44	17.33	17.48	14.84	16.23
17.03	17.01	19.74	22.77	17.98	19.4	20.15	18.08	16.12	13.52	16.6
16.29	16.25	14.48	15.82	15.01	20.56	19.98	17.17	16.01	17.68	16.75
16.92	16.71	16.39	20.63	16.51	19.74	20.83	16.44	16.96	17.04	16.68
11.67	16.94	14.95	20.46	22.08	11.96	19.72	14.94	16.25	16.34	16.47
16.15	17.08	19.41	19.24	17.21	12.26	21.05	17.03	16.9	16.26	17.24
16.89	16.91	15.87	20.56	16.38	20.07	20.92	16.24	16.81	16.71	16.18
17.08	16.06	16.04	20.04	16.72	20.11	21.12	17.26	9.937	16.4	16.66
10.36	16.21	16.19	20.81	18.43	21.18	23.65	17.12	17.04	17.05	16.57
17.13	16.61	15.96	20.77	9.6	19.56	13.1	16.85	16.7	16.82	16.97
16.32	16.61	17.21	17.88	16.26	20.92	20.13	16.59	16.62	16.53	16.06
16.07	17.38	18.68	19.32	16.69	21.79	19.48	14.46	17.38	18.16	15.22
16.43	22.92	16.5	19.63	17.26	19.61	23.38	16.17	17.44	16.44	15.88
16.52	9.765	14.48	13.5	15.93	19.43	18.92	17.06	16.73	17.47	16.65
16.7	19.53	19.59	19.73	16.41	23.59	20.67	16.91	16.93	16.31	17.22
16.26	16.71	15.43	19.76	17.2	21.01	20.45	18.11	16.46	19.67	16.66
16.84	13.09	17.1	19.87	16.81	19.89	18.85	16.12	17.39	17.07	9.881
16.56	19.77	15.89	19.19	15.73	19.77	20.97	15.93	16.44	16.83	15.08

16.68	16.4	19.29	18.15	10.82	20.49	22.86	15.24	16.88	17.29	15.97
16.97	16.34	14.57	19.76	12.59	21.1	23.35	15.55	17.02	16.82	16.88
11.03	16.92	19.27	18.83	16.68	19.62	23.61	16.45	14.34	16.79	16.17
16.21	21.87	16.15	19.65	16.52	19.64	20.07	16.43	13.65	16.51	16.25
21.61	16.75	17.5	22.64	17.32	19.82	19.82	17.27	15.9	17.05	16.16
16.67	16.51	16.09	18.93	12.94	18.63	21.07	16.92	15.97	18.36	17.06
16.65	17.1	12.38	19.11	17.04	20.17	20.32	17.35	19.79	17.41	16.03
16.27	16.96	15.74	18.66	16.81	24.37	19.8	16.61	19.84	18.53	16.64
20.74	16.92	9.097	19.36	19.93	21.63	20.55	16.12	17.63	16.55	16.68
22.4	16.93	14.98	16.05	15.26	20.74	19.8	16.63	17.66	16.19	16.97
17.73	16.87	15.52	19.29	18.56	19.9	19.24	14.62	19.36	16.79	16.88
16.9	16.22	16.17	18.97	15.9	19.91	22.53	17.81	18.37	14.66	16.51
16.07	16.1	16.53	18.77	15.56	13.52	24.46	16.8	17.68	16.84	15.97
9.609	16.88	17.11	19.42	16.51	19.39	20.91	15.96	13.95	16.82	17.32
16.79	16.32	16.35	19.42	16.13	19.96	21.29	15.46	16.98	17.6	15.88
21.4	15.96	15.21	24.11	16.61	20.97	19.85	17.09	18.96	8.348	16.38
17.22	16.26	15.5	19.85	17.05	21.08	21.26	17	15.18	16.22	15.67
16.06	16.42	20.07	19.29	18.99	19.4	19.56	16.16	14.16	9.978	16.82
16.9	16.19	16.14	19.98	14.85	20.07	20.31	16.53	17.39	13.62	16.28
13.08	9.711	15.99	19.6	13.11	12.52	20.21	17.45	16.55	16.65	17.47
17.46	16.82	15.62	19.67	17.65	16.2	22.33	17.15	13.82	18	16.89
16.68	16.66	16.45	19.68	18.96	20.56	20.32	16.21	16.87	16.95	16.31
18.15	16.76	15.87	18.04	16.39	23.69	19.08	15.95	16.56	9.958	16.28
17.48	21.4	16.35	18.89	16.4	19.2	19.41	16.65	16.16	16.48	14.79
16.61	16.09	16.08	20.13	18.19	19.49	21	15.04	16.87	9.108	16.27
15.89	16.42	17.33	21.38	16.33	20.98	20.8	16.95	16.55	16.81	16.31
16.39	16.39	18.24	19.1	17.27	19.54	19.91	17.37	14.29	16.3	15.83
18.22	17.51	15.68	20.9	16.52	14.32	14.64	16.86	14.51	16.67	16.05
16.98	10.3	12.6	21.75	16.49	26.87	24.82	15.8	16.65	17.11	16.2
13.24	16.49	15.62	21.14	16.57	19.96	20.07	19.61	16.77	16.78	15.66
16.35	16.07	18.81	19.59	16.56	20.38	21.38	19.1	16.96	16.72	16.57
17.09	16.16	15.83	17.96	16.59	19.83	23.07	17.6	16.14	15.8	16.21

9.632	16.28	15.27	21.29	16.38	20.63	20.81	16.24	16.13	16.54	7.961
16.04	16.89	17.03	18.79	13.87	20.76	23.45	16	16.65	19.64	16.59
16.76	17.44	12.49	17.11	19.64	20.9	20.18	9.895	16.88	16.85	14.16
16.72	16.6	18.33	20.04	10.13	19.73	23.67	16.66	16.65	16.45	16.55
16.29	21.74	16.85	19.09	20.4	22.21	19.9	16.94	16.25	14.82	16.41
16.64	17.11	14.98	19.79	22.86	24.78	20.36	19.55	16.46	16.29	13.98
16.14	10.26	18.12	20.81	19.15	19.78	22.83	17.68	16.97	16.65	16.26
16.69	16.11	19.81	20.89	18.55	21.38	20.38	15.05	17.25	16.9	16.21
16.45	16.49	18.37	20.71	17.54	19.69	22.06	17.21	14.95	16.61	17.75
16.44	17.33	15.92	19.11	16.85	20.68	18.58	19.79	16.84	16.66	15.1
16.21	17.07	12.18	23.28	18.1	20.27	20.14	14.88	19.04	16.59	16.32
10.07	16.39	16.2	19.37	17.08	21.22	20.29	16.51	17.95	18.45	16.51
16.93	16.99	12.99	21.36	17.44	20.9	20	16.8	14.29	16.44	16.04
16.41	16.54	15.78	19.12	9.54	19.44	22.68	15.52	16.89	16.85	17.1
16.54	16.41	1.487	21.98	19.88	20.35	19.25	16.82	17.08	14.12	16.71
16.53	10.11	15.66	18.6	10.81	19.6	20.38	17.18	16.87	15.79	16.16
16.23	16.55	16.29	18.3	14.56	21.03	20.16	19.48	16.65	16.77	17.04
16.73	16.76	13.28	17.23	15.88	20.16	22.49	17.17	16.91	16.3	15.99
17.12	16.92	16.27	19.7	18.14	20.03	20.86	17.25	17.05	16.79	16.29
16.71	17.28	16.55	22	16.06	19.24	21.01	16.73	17.26	16.62	17.47
14.63	17.2	16.35	20.22	17.44	19.39	13.02	16.44	17.88	17.2	16.83
18.24	16.06	16.27	20.13	16.31	21.02	18.81	19.39	16.78	16.83	19.19
16.98	17.17	16.44	19.61	17.07	21.78	19.81	17.81	7.997	16.61	16.54
16.01	16.96	16.35	19.17	17.03	20.27	25.94	16.1	16.47	16.95	16.4
16.65	17.45	16.76	21.61	9.66	21.96	14.07	16.85	16.74	16.56	15.99
16.18	10.21	16.42	18.96	15.22	22.81	17.07	19.49	16.97	16.74	17.04
22.23	17.29	15.72	21	16.86	19.57	16.09	16.61	16.69	16.34	16.38
16.35	17.57	16.53	18.55	17.29	20.59	12.86	15.79	14.55	16.86	16.03
16.48	16.52	16.64	19.49	17.36	20.03	21.26	16.02	16.78	16.47	15.72
17.08	17.16	17.13	21.7	17.05	20.76	20.1	16.97	17.55	23.29	16.23
16.43	9.695	16.19	19.31	16.29	19.98	20.75	19.9	16.84	13.85	14.57
16.8	17.33	16.81	18.38	21.36	11.75	20.54	13.67	17.16	19.12	16.94

19.66	17.07	16.62	19.08	17.2	26.46	21.12	15.58	16.38	13.33	15.96
13.5	16.63	20.14	18.14	16.83	20.2	18.7	16.67	16.7	17.6	17.09
16.8	16.87	15.91	20.78	16.79	21.1	16.45	6.835	17.87	17.83	16.32
16.35	14.71	18.63	19.76	16.79	20.03	15.37	16.96	13.84	14.72	16.5
17.06	10.11	12.83	20.13	9.83	26.03	20.82	17.68	17.39	18.82	16.22
16.36	17.03	15.99	20.15	17.07	20.24	23.65	16.52	16.52	16.68	16.51
16.23	17.11	15.76	19.29	17.39	20.18	20.56	16.14	16.88	19.49	16.36
17.26	16.29	17.15	18.92	16.77	20.5	19.58	17.22	16.57	13.53	16.16
16.86	15.64	16.75	14.55	14.43	19.97	21.27	16.37	16.67	23.51	16.2
16.34	17.45	15.6	18.25	20.61	20.19	20.74	16.74	16.61	15.87	14.49
16.82	16.94	15.92	19.55	16.81	20.08	22.17	14.56	15.92	16.32	15.9
16.17	16.73	17.02	19.45	16.64	20.02	20.4	15.8	16.64	16.35	15.99
16.24	16.33	16.82	20.64	16.4	19.81	19.6	16.36	15.31	17.25	16.3
17.41	17.03	15.88	20.82	17.54	20.92	13.57	16.73	15.88	16.78	17.09
16.36	16.53	16.8	20.61	16.39	21.13	21.65	15.66	17.03	16.32	16.22
16.51	16.25	13.98	18.93	15.79	20.23	20.59	17.02	15.78	16.83	16.74
Середнє значення										
16.41169	16.42702	15.95373	19.67496	16.24102	20.21213	20.30944	16.60108	16.5335	16.47171	16.12161

Значення масивів відносної амплітуди

Значення відносної амплітуди для циліндрів із зазором < 0.62 мм												
Значення зазору в циліндрі, мм												
0.47	0.53	0.54	0.49	0.48	0.53	0.59	0.49	0.46	0.55	0.47	0.51	0,59
Номер експерименту												
S303	S314	S329	S334	S341	S350	S358	S364	S371	S380	S388	S406	S697
37.42	41.9	77.37	49.26	49.08	69.42	41.93	66	68.16	46.47	36.88	73.45	82.34
57.26	75.95	56.93	74.97	55	61.19	72.59	54.17	39.48	65.08	50.07	47.4	49.72
78.65	55.48	57.59	78.56	46.58	67.59	47.55	49.37	31.68	69.62	34.71	44.28	96.16
69.94	52.49	58.4	51.18	43.02	63.18	52.79	38.18	73.11	57.44	91.47	45.74	56.63
51.96	84.59	73.08	73.93	63.04	45.23	42.35	52.22	70.03	87.54	89.63	50.76	64.49
75.21	34.34	72.3	79.93	46.12	61.27	51.02	59.63	79.73	26.62	59.73	64.05	72.76

74.5	82.33	48.48	33.11	40.83	69.37	64.77	80.25	73.82	83.74	17.12	76.71	94.13
48.68	46.5	61.07	48.38	62.53	68.6	105.3	67.3	45.67	26.1	45.48	77.53	63.53
68.96	62.82	82.57	63.16	53.17	65.02	53.76	45.63	66.34	25.4	35.61	86.63	69.98
73.06	43.02	40.05	38.1	54.44	50.02	72.15	38.92	78.88	95.02	66.88	41.29	48.24
34.9	42.55	78.6	33.86	52.16	72.74	92.35	45.78	23.66	43.17	72.62	26.09	78.91
42.25	72.16	55.28	77.66	42.19	73.65	86.84	51.71	70.13	90.95	76.28	38.53	99.15
48.65	77.05	79.73	72.61	46.13	49.91	98.51	59.83	77.19	72.52	78.26	77.96	64.5
73.07	44.53	80.12	44.72	59.72	64.61	82.96	23.14	38.6	89.58	74.81	30.4	91.73
80.87	67.81	83.19	46.46	59.77	43.51	84.13	88.03	17.5	86.71	63.2	35.06	81.57
75.97	46.22	80.56	32.5	68.11	39.24	40.56	27.83	21.26	94.45	84.13	77.76	95.58
45.89	33.47	66.48	64.21	39.89	50.12	42.18	88.32	52.74	59.16	19.37	25.88	69.75
61.48	75.25	54.94	66.28	56	64.97	44.7	84.43	60.35	92.73	75.02	72.19	59.52
71.85	49.96	44.32	44.05	60.69	68.53	56.65	53.08	84.88	33.38	76.25	39.16	89.51
33.79	38.99	36.61	36.69	41.1	58.2	69.3	45.47	15.46	27.2	69.69	39.43	35.28
55.65	83.5	53.33	78.76	49.87	63.81	46.16	57.9	87.86	39.86	38.44	33.98	81.6
48.13	40.25	74.21	39.47	54.41	76.27	59.34	52.69	69.84	43.83	50.01	52.48	90.28
41.89	70.62	40.17	45.05	66.22	66.09	86.69	79.61	33.19	87.57	59.65	74.48	93.29
33.48	65.49	73.75	32.29	56.68	46.83	50.83	76.52	80.95	58.76	44.27	45.98	88.95
39.77	50.86	72.65	38.68	55.7	42.21	110.27	29.3	55.38	44.7	40.52	25.21	32.64
57.2	43.33	39.52	51.65	45.62	74.48	112.21	25.32	63.65	56.68	24.74	48.06	55.08
67.02	79.75	65.55	31.85	57.91	45.62	100.62	70.54	90.84	87.49	50.97	46.85	35.86
33.06	66.08	75.54	50.96	67.61	66.3	109.68	34.34	34.94	89.22	66.6	28.12	87.71
34.99	40.81	67.88	33.43	54.67	40.99	108.73	31.22	76.88	27.88	65.52	77.76	83.18
49.36	70.45	57.67	51.02	39.48	58.28	44.99	32.79	89.81	32.11	88.78	69.7	45.82
63.87	77.11	41.94	51.36	50.19	70.01	69.29	25.82	23.26	78.72	65.77	55.64	90.23
68.53	76.44	62.24	65.27	65.23	64.53	91.17	40.5	40.61	99.54	16.76	66.7	33.71
42.18	37.02	76.55	34.47	45.28	74.28	56.37	73.29	18.06	88.86	45.07	29.36	33.46
75.04	71.56	50.62	39.66	64.25	65.65	109.68	87.99	41.24	69.47	77.7	38.25	55.97
69.55	65.08	69.12	45.87	53.73	41.68	82.41	76.8	32.33	32.59	34.59	50.33	58.41
72.79	64.55	52.28	71.98	43.66	46.44	55.18	52	31.03	97.83	41.99	67.36	87.09
46.86	53.69	80.32	42.76	58.67	74.49	78.82	65.44	58.03	63.87	75.46	86.53	58.43
59.02	75.14	77.37	47.07	66.41	54.31	86.4	73.48	50.12	98.03	82.26	58.27	60.73

52.81	34.18	82.51	66.45	57.14	78.03	39.19	85.76	49.71	62.65	22.37	41.81	92.82
75.83	61.47	60.78	56.18	41.34	67.78	35.25	76.85	49.4	37.38	38.43	54.24	100.3
70.96	58.95	44.35	67.04	61.19	78.94	86.69	52.59	46.72	66.57	38.2	59.07	66.74
66.25	74.09	61.47	34.73	64.4	49.3	34.7	80.68	64.57	81.68	71.27	88.63	70.57
56.39	33.5	65.63	66.24	56.52	65.79	95.4	38.38	25.33	86.58	29.14	32.28	42.02
36.2	63.6	78.57	36.91	53.77	52.66	115.68	23	86.76	82.5	38.54	53.67	48.95
55.84	35.54	41.59	33.11	52.04	78.85	30.81	82.75	93.9	98.34	48.27	49.68	98.2
48.93	48.77	73.73	32.68	55.85	73.81	47.28	41.4	26.29	45.1	30.74	39.25	87.16
70.67	64.76	33.95	76.18	44.55	46.52	112.82	69.6	28.74	61.43	73.07	49.67	47.84
53.67	72.08	31.55	43.89	52.92	39.33	37.19	67.33	47.87	94.21	23.91	82.33	80.6
76.49	73.99	43.99	75.56	61.54	54.73	36.89	49.58	25.12	81.42	16.15	26.14	55.58
74.79	75	72.77	56.65	60.91	64.97	58.39	84.06	18.66	71.66	73.66	36.66	32.57
38.57	61.26	51.48	61.02	47.36	63.19	40.57	54.61	84.34	40.4	88.55	29.31	50.87
63.23	60.29	34	75.36	54.49	48.08	85.3	44.18	81.51	65.23	20.56	47.03	40.54
37.14	80.67	59.87	58.32	50.06	77.36	68.73	55.02	69.25	89.55	37.75	76.8	48.83
36.71	46.67	44.03	56.49	66.27	56.66	58.05	45.8	70	47.65	53.31	86.58	78
41.64	56.32	70.91	57.47	62.15	72.07	88.12	61.03	55.94	50.85	28.71	57.34	50.32
60.22	78.63	47.48	37.19	56.4	54.92	103.95	36.07	93.12	75.63	87.03	70.55	35.44
47.91	40.78	42.67	79.59	60.84	71.08	84.77	64.2	18.84	99.1	53.79	63.11	73.56
43.5	58.05	66.94	46.53	46.41	65.04	97.81	50.48	84.89	54.91	82.03	33.99	93.75
67.47	70.79	67.71	42.69	42.55	41.22	76.04	25.14	53.46	94.64	16.72	75.59	53.3
56.84	78.31	42.75	64.33	54.58	71.15	55.02	52.08	16.09	69.92	39.57	85.92	47.67
32.89	52.88	41.4	55.12	67.39	45.8	74.1	80.55	16.18	88.15	25.44	84.18	89.07
42.01	34.91	48.91	66.54	62.14	39.56	88.3	37.79	61.27	58.68	86.05	77.87	66.68
58.33	33.22	50.15	34.8	49.59	74.05	69.5	84.71	21.95	45.02	78.26	76.72	68.4
69.77	81.41	37.48	71.23	47.62	46.46	106.31	21.75	53.37	57.03	83.07	49.68	90.82
69.36	82.56	70.16	34.96	45.37	71.88	59.49	22.41	48.67	32.01	80.7	81.05	69.57
70.42	77.71	66.9	73.76	53.8	40.73	90.08	85.42	41.44	93.47	32.19	39.92	64.92
41.03	46.27	49.69	74.33	67.87	74.41	101.77	67.67	89.14	41.71	78.51	82.38	72.72
39.2	70.02	62.19	35.67	59.91	39.18	72.83	36.16	22.66	56.59	88.2	66.76	54.68
58.33	62.21	62.72	50.11	62.85	78.79	67.67	51.55	45.16	96.2	86.16	60.07	99.94
42.82	53.53	62.18	66.97	64.8	40.02	45.41	23.5	33.59	44.86	47.49	88.32	34.08

38.08	58.67	39.56	36.24	46.14	41.51	40.26	46.59	16.5	30.6	19.49	32.92	94.21
78.95	64.85	54.27	63.3	65.44	48.89	52.95	86.08	90.69	92.18	86	41.04	91.61
76.28	75.74	68.56	40.59	65.18	41.7	66.53	57.63	21.63	49.36	46.67	34.85	89.72
65.02	56.74	38.16	41.22	42.24	67.39	91.02	46.65	61.36	79.77	42.11	86.77	63.75
60.04	40.17	42.73	75.34	44.56	67.59	33.65	49.07	39.47	27.25	74.47	38.89	54.46
57.99	79.71	46.06	31.94	47.64	75.8	66.98	47.27	59.24	81.16	32	73.51	53.23
58.14	53.47	63.74	65.66	60.89	72.3	45.04	71.93	39.57	76.51	86.1	72.74	99.61
81.65	66.35	81.81	74.22	67.8	61.51	48.67	72.61	26.18	71.1	82.17	77.17	59.41
79.19	84.57	63.49	49.61	47.21	78.53	48.97	83.53	22.92	51.37	47.75	29.54	81.76
63.04	56.38	71.88	69.91	48.31	44.04	101.3	49.51	40.35	72.31	86.53	64.6	36.49
61.61	74.38	55.58	43.86	61.12	51.18	60.11	41.74	56.1	60.32	87.32	59.94	73.22
54.43	53.91	52.01	42.8	47.98	67.74	110.72	30.3	91.88	46.79	32.11	30.6	97.7
34.37	75.23	51.81	78.45	57.84	43.16	77.59	71.34	84.61	33.15	51.83	84.7	87.65
42.61	41.17	55.62	62.46	58.22	72.66	32.36	69.79	77.26	79.27	86.68	64.14	51.2
62.6	74.04	63.26	76.05	66.88	51.18	75.29	56.54	59.69	37.28	82.1	85.59	39.28
71.81	71.96	32.02	73.03	40.63	58.1	89.43	54.03	93.79	84.39	24.94	88.74	45.06
67.15	62.47	56.97	78.89	66.89	46.45	45.02	26.08	85.67	67.27	64.58	93.25	97.77
82.14	80.65	44.44	42.25	43.96	46.24	42.77	45.45	51.2	36.22	79.8	82.67	86.79
82.06	55.48	78.85	47.51	45.19	60.48	29.58	71.13	18.77	99.31	66.32	30.07	74.21
39.72	61.56	83.14	68.58	40.86	58.72	36.78	38.29	21.86	27.05	46.19	73.78	72.82
39.2	46.57	48.15	35.38	66.3	65.46	38.82	70.89	37.25	37.31	80.5	67.63	59.11
60.46	45.48	57.08	59.46	51.92	57.19	41.45	30.15	31.36	26.07	48.7	71.61	81.59
43.92	71.39	60.98	63.87	41.45	53.27	48.84	80.76	37.24	41.52	19.79	29.47	96.02
53.68	58.09	83.25	72.98	50.08	60.48	42	53.68	80.09	73.57	34.03	67.45	80.5
80.92	54.71	81.25	50.17	53.34	52.64	64.98	20.94	83.7	38.95	76.96	84.23	46.61
37.49	61.66	69.45	33.09	65.91	67.05	102.1	51.26	43.77	29.34	75.08	72.23	78.37
64.38	82.33	65.67	65.73	45.27	45.3	98.05	65.91	86.23	34.65	52.62	79.9	57.67
52.12	64.31	68.33	61.36	45.76	75.94	83.85	55.12	85.8	62.04	28.1	65.6	86.69
71.32	41.64	80.21	73.89	52.74	44.31	34.52	31.68	61.85	98.3	29.07	66.2	88.19
73.17	33.88	32.69	34.83	59.65	76.74	79.88	78.19	46.91	95.99	84.17	83.27	69.36
72.42	56.32	44.06	76.48	51.28	53.81	39.21	48	21.72	66	54.95	67.97	42.7
50.93	60.27	31.74	64.5	57.92	60.05	113.2	42	21.68	78.73	55.38	58.85	96.13

49.17	84.05	69.14	68.75	39.62	52.47	68.16	61.99	55.63	87.6	51.24	28.07	34.11
77.69	37.97	80.84	52.61	67.73	39.72	72.23	33.29	35.47	37.9	27.65	33.03	98.51
61.56	49.6	38.55	80.29	50.02	42.18	94.88	51.3	45.41	29.12	18.57	34.22	50.32
59.31	45.79	69.82	73.36	57.92	57.77	102.8	56.33	85.42	61.24	64.77	89.11	82.27
55.35	33.25	71.24	52.63	57.26	62.48	66.23	61.98	53.92	63.9	41.99	76.18	38.69
42.87	65.87	39.5	36.21	39.49	42.39	57.41	50.03	35.76	70.62	37.35	48.94	53.31
72.85	57.48	45.88	31.63	66.75	51.13	50.92	39.24	32.6	85.89	17.83	26.71	37.82
76.79	63.83	37.52	75.37	42.31	54.27	64.02	87.06	79.07	50.24	66.14	89.03	85.17
56.51	35.91	40.47	74.23	59.07	55.84	35.29	67.07	51.91	53.15	78.7	57.18	92.49
54.95	65.32	64.48	74.62	64.45	66.05	114.1	23.54	71.52	73.54	82.23	59.89	68.78
59.14	55.94	69.52	46.79	41.92	72.93	92.82	29.77	91.66	98.2	83.3	59.06	78.42
71.61	47.19	72.78	71.85	46.69	51.95	30.55	85.29	30.14	37.05	84.4	83.27	69.77
49.96	43	34.8	69	63.22	58.27	30.83	61.82	43.97	31.72	81.91	82.9	95.71
38.43	64.14	59.13	52.93	56.96	56.45	81.97	22.24	21.36	100.07	63.67	81.84	53
80.58	75.18	48.09	74.84	53.94	71.65	30.37	48.74	69.2	84.13	46.26	44.4	66.41
40.26	63.16	56.24	76.65	60.33	51.7	97.45	22.08	73.62	83.71	84.36	44.01	41.55
89.78	82.66	56.41	47.47	60.73	51.65	67.2	22.85	65.88	30.07	73.68	66.27	47.18
81.34	65.95	64.71	42.86	47.91	58.65	66.16	60.02	77.24	32.31	37.33	29.19	37.91
81.39	44.46	77.6	51.45	59.85	69.06	68.2	57.71	50.42	44.28	55.13	26.7	34.72
48.3	69.43	44.14	45.78	47.44	59.37	75.94	57.08	68.08	39.03	22.08	43.97	64.54
54.19	43.11	81.29	64.11	59.79	72.43	82.33	72.58	49.76	57.82	17.24	69.31	64.52
41.67	82.77	56.58	72.5	53.25	54.72	32.14	47.53	69.83	35.37	16.22	80.77	77.55
47.87	36.02	39.37	33.92	66.59	54.02	52.32	60.76	41.68	60.85	49.94	66.49	90.88
52.43	67.38	54.65	39.09	45.66	77.05	80.32	67.79	49.16	53.42	22.98	63.68	39.74
44.25	63.29	69.23	67.02	60.11	53.11	44.92	61.67	43.64	75.93	16.96	48.14	93.77
Середнє значення												
57.98512	59.75165	59.03693	55.73961	54.29441	59.10016	68.24268	54.41606	53.38047	63.01811	55.04402	58.77354	68.28709

Значення відносної амплітуди для циліндрів із зазором > 0.62 мм										
Значення зазору в циліндрі, мм										
0.82	0.82	0.81	1.09	0.82	1.13	1.13	0.82	0.82	0.82	0,81
Номер експерименту										
S608	S12	S634	S693	S701	S717	S721	S729	S862	S878	S890
111.76	112.99	47.36	50.47	93.18	82.8	152.31	145.74	72.92	54.46	60.34
119.98	105.64	122.09	75.51	53.12	95.95	79.23	114.55	127.66	88.5	50.18
97.58	63.09	125.96	142.42	70.65	154.5	74.7	73.55	39.77	88.71	105.98
58.53	107.7	66.65	73.85	57.21	145.97	58.19	100.18	93.27	88.57	66.74
99.18	79.04	108.16	110.3	86.75	70.7	150.25	66.1	49.68	73.87	69
94.72	43.86	46.7	128.98	47.12	93.77	101.67	74.09	40.45	63.3	115.4
76.05	58.74	46.73	115.76	96.4	113.33	156.5	67.31	73.72	87.87	66.41
108.49	142.87	122.74	144.31	128.57	91.2	135.21	95.62	65.97	105.45	81.33
112.23	59.79	102.12	133.15	128.56	114.32	58.27	83.95	121.32	126.45	84.84
56	136.4	47.89	78.13	95.65	72.14	60.76	65.47	40.31	124.67	119.45
132.95	62.61	105.38	141.39	59.1	68.5	156.67	122.99	51.44	93.13	114.33
75.62	107.37	113.67	127.54	124.57	130.93	117.08	104.07	73.11	78.12	60.54
130.5	89.53	50.67	125.8	51.89	124.69	98.46	56.68	120.17	123.24	83.5
99.95	59.05	57.08	100.49	45.94	104.06	67	76.15	67.67	49.42	111.69
79.62	122.72	68.07	61.79	63.52	51.24	113.83	55.34	52.14	36.17	141.81
57.67	118.89	65.34	82.12	137.88	81.8	159.37	47.5	48.32	80.28	114.9
85.83	129.79	52.98	108.22	72.93	56.27	55.95	139.29	77.14	114.59	65.36
104.28	80.93	111.52	71.868	101.96	69.15	139.75	47.1	41.56	103.37	49.9
41.17	47.32	58.76	60.54	134.42	105.7	59.19	101.07	89.53	130.05	44.45
85.48	98.88	71.23	136.72	68.61	153.77	154.96	105.63	74.37	78.12	72.74
82.94	133.38	44.13	86.03	106.74	111.3	71.49	81.25	66.05	96.29	30.95
116.41	112.66	115.05	103.09	93.19	138.63	162.04	64.19	89.18	85.81	36.19
95.47	112.26	79.94	109.05	66.18	101.01	59.11	94.72	38.99	64.69	132.09
70.38	126.34	124.47	108.42	80	119.9	116.48	124.15	135.18	91.12	94.23
114.91	70.32	48.77	92.91	50.13	159.53	158.16	115.07	111.72	74.66	141.98
48.3	143.01	94.49	137.39	112.45	106.68	129.91	103.93	126.09	113.13	53.45
64.95	99.61	117.87	156.24	139.21	112.51	103.33	134.46	35.91	40.36	126.77
92.5	142.14	93.61	88.56	112.13	162.88	68.16	105.42	135.34	118.36	101.03
119.34	119.26	49.24	78.97	127.54	96.43	124.73	74.93	59.9	94.75	40.39
88.12	127.91	70.66	66.43	111.23	152.38	135.29	46.58	111.28	82.65	115.62

119.23	132.51	126.13	51.84	90.35	141.41	63.36	89	122.74	86.52	58.65
89.76	124.51	105.66	89.14	61.25	75.63	119.83	49.68	85.17	126.63	76.42
93.26	107.42	85.06	93.38	93.87	155.09	129.9	106.91	121.98	132.75	65.28
42.57	44.93	72.39	140.91	60.21	78.71	82.59	58.6	60.32	86.2	32.73
120.33	44.9	65.23	100.66	55.28	157.68	57.46	85.07	61.54	133.14	91.62
75.55	124.5	103.04	95.8	122.51	138.57	162.44	63.64	43.8	100.1	94.27
78.86	135.17	55.07	88.57	107.71	64.53	72.84	118.71	57.27	50.14	29.72
54.03	113.43	117.65	105.23	72.12	105.27	148.21	121.86	122.15	95.99	46.28
60.8	139.96	83.6	116.64	66.51	96.61	100.54	141.7	127.07	45	77.81
133.32	59.37	72.72	78.83	90.03	104.88	82.29	125.39	125.9	53.08	76.9
113.88	41.39	103.15	130.93	59.89	130.85	63.29	107.93	48.84	102.91	123.81
60.41	59.32	73.48	84.69	84.99	138.06	76.56	135.89	108.32	106.86	52.05
90.49	75.83	50.76	117.31	116.57	55.43	160.72	71.99	129.87	112.43	96.75
93.73	79.22	65.43	74.2	126.69	108.52	157.57	116.56	62.85	104.4	80.93
52.77	53.57	90.15	120.87	69.89	57.01	64.53	146.55	114.97	130.88	62.44
65.77	74.03	99.57	84.72	110.59	100.74	116.26	83.9	104.62	44.1	35.72
132.11	57.07	113.43	78.87	83.07	74.63	61.59	59.67	132.92	123.42	38.39
116.7	80.11	94.51	110.36	89.36	49.42	66.81	121.97	49.83	120.09	83.66
104.7	74.79	89.42	143.78	140.89	54.79	55.01	123.43	93.65	91.6	131.02
93.68	104.73	89.72	121.02	43.31	96.53	119.82	58.55	127.66	127.78	123.31
119.52	51.66	73.61	97.85	118.42	119.17	127.6	76.9	111.42	76.43	56.65
110.11	96.24	89.22	93.09	122.77	163.12	98.62	79.9	128.7	108.46	69.17
114.14	53.6	57.18	105.91	78.51	64.55	147.97	59.94	98.19	63.8	133.57
105.36	125.42	49.39	83.28	134.68	154.98	59.35	45.96	48.87	114.49	132.08
106.82	90.72	55.51	62.08	97.59	136.67	104.92	78.93	83.73	66.6	66.83
53.34	42.33	79.65	96.77	110.41	67.55	76.06	107.13	41.96	84.85	71.53
122.38	111.79	85.93	113.37	75.24	159.52	108.21	81.66	119.72	115.24	124.43
70.52	64.08	87.77	117.66	123.98	55.5	51.47	78.81	91.5	81.01	106.13
60.13	122.44	81.56	64.71	133.47	69.39	59.21	58.56	102.15	36.42	113.49
97.49	131.2	84.16	52.92	92.53	101.73	145.68	72.83	67.15	96.6	61.13
47.61	124.36	96.52	136.07	51.43	165.57	60.49	46.33	100.76	133.36	69.84
97	99.26	112.55	69.96	139.8	89.28	115.94	45.86	67.03	85.48	124.19
84.14	133.5	56.38	103.25	49.75	66.28	109.64	62.46	103.8	81.35	124.77
66.35	132.22	51.89	69.59	43.63	157.26	66.5	50.92	81.38	112.54	130.62
81.98	76.68	113.74	78.28	63.89	96.23	146.53	50.39	72.55	112.59	37.43
55.12	103.13	108.17	120.44	56.76	52.22	116.53	74.24	101.34	87.64	64.59

49.42	130.32	70	72.95	122.31	156.52	120.88	67.45	130.57	126.46	80.51
50.17	120	124.66	147.88	114.55	63.3	139.22	123.17	115.63	72.6	67.23
113.16	77.58	68.54	143.56	73.91	49.36	139.85	82.43	50.36	108.4	114.66
106.82	65.46	117.13	142.85	120.74	160.67	108.39	58.77	100.34	128.02	126.62
124.51	82.19	51.27	54.71	74.88	123.17	138.21	124.12	103.56	59.36	137.52
118.16	64.07	73.02	80.76	133.69	171.62	74.57	144.01	55.87	97.97	138.11
50.82	130.43	95.62	148.28	79.54	57.63	140.25	45.83	94.39	55.76	56.04
71.48	71.74	99.88	143	129.75	75.12	82.69	69.81	94.14	75.49	53.18
50.63	131.8	93.06	112.16	46.5	68.85	107.49	54.8	68.58	122.3	141.34
89.68	93.51	108.52	94.86	75.23	49.54	62.76	78.31	121.01	72.04	120.38
117.83	69.92	93.31	138.83	109.71	139.01	104.54	48.87	128.73	44.01	29.19
72.6	141.12	113.98	94.46	84.28	92.83	117.74	111.76	135.61	127.21	137.35
73.38	54.3	127.76	158.95	114.63	74.07	113.99	132.04	97.88	82.93	122.49
116.3	112.06	77.64	104.42	87.76	80.24	118.5	97.39	80.19	72.57	114.99
72.13	71.94	43.28	69.73	80.16	54.96	120.36	45.4	129.55	61.23	62.35
115.11	128.11	108.01	68.65	96.66	79.21	151.6	46.98	58.79	87.42	131.09
52.89	104.76	98.3	120.42	82.09	55.37	130.45	88.98	51.75	45.81	65.09
100.5	88.33	120.04	156.82	83.36	63.38	56.88	127.24	61.7	75.98	61.97
85.49	106.21	121.03	112.38	114.15	130.05	77.2	48.52	71.37	96.45	134
97.55	95.59	122.98	98.65	61.73	75.96	161.3	92.86	116.04	89.4	52
42.99	95.08	96.19	53.17	130.47	69.59	59.57	128.85	116.96	42.58	89.25
113.17	103.92	60.42	50.98	92.81	107.78	100.21	71.89	101.41	118.1	126.17
82.85	64.13	68.43	136.87	122.05	56.43	80.37	102.33	38.93	106.09	105.5
70.84	140.04	108.12	113	93.69	124.58	75.62	58.18	48.83	96.32	33.93
82.96	63.12	114.02	110.51	129.82	79.8	70.95	62.72	84.49	78.66	133.95
117.87	57.71	88.96	147.47	80.7	124.31	96.79	100.22	60.33	121.92	126.93
80.58	52.11	119.28	48.8	46.7	113.39	150.04	113.62	97.03	42.1	67.6
86.03	76.63	56.16	51.78	121.47	166.9	94.51	69.33	55.9	55.8	134.77
48.09	88.4	117.44	129.25	116.24	167.28	110.81	140.69	117.17	44.14	53.87
129.78	45.14	87.1	117.61	124.84	133.98	155.79	79.74	115.31	82.9	66.45
113.36	137.2	129.46	84.22	70.97	125.68	102.51	52.78	122.2	40.45	73.37
100.54	105.27	105.58	52.87	49.22	145.57	69.1	137.77	93.34	116.15	101.4
122.99	69.55	84.02	71.8	129.07	82.05	154.78	113.25	52.86	81.2	129.95
57.48	88.03	65.63	118.17	55.52	160.75	118.45	92.73	90.9	118.82	44.71
125.88	54.53	84.03	52.93	84.45	98.48	62.35	116.62	105.54	79.23	56.49
131.35	113.54	81.09	147.42	80.13	58.32	73.54	96.72	53.21	114.86	119.4

111.65	75.1	97.2	89.68	110.73	100.95	82.19	87.99	95.69	124.99	53.14
73.47	131.67	129.29	129.28	61.94	78.22	108.74	99.13	77.32	87.65	131.4
111.26	99.4	130.54	110.06	117.06	67.97	147.43	139.78	111.74	93.14	49.42
90.85	62.39	58.45	137.63	98.26	89.27	149.47	110.98	107.79	115.57	35.69
122.25	44.42	54.81	96.37	70.45	116.69	69.04	125.72	42.87	98.26	34.27
103.31	105.84	55.8	147.68	55.18	148.45	144.83	70.72	93.42	56.79	81.01
120.23	44.85	50.7	139.6	132.29	151.73	111.81	88.57	97.99	50.93	130.26
57.46	129.93	103.25	105.37	117.95	78.64	120.75	129.7	98.74	118.55	136.76
88.7	62.05	49.37	83.17	109.74	157.48	153.81	103.94	103.21	69.08	44.69
125.72	49.33	75.47	113.58	98.75	161.06	156.94	86.96	118.92	44.3	32.52
47.06	59.33	108.85	105.34	84.05	60.86	68.23	109.16	102.26	94.61	98.6
40.98	103.5	64.7	93.72	92.65	53.98	151.21	116.03	110.52	128.95	57.41
102.93	84.23	98.58	56.6	108.83	122.19	97.75	51.55	47.59	75.39	41.44
61.24	94.44	119.81	131.85	98.18	125.9	75.53	87.11	88.45	118.08	138.77
132.28	57.33	105.07	135.45	136.92	165.74	159.08	129.96	87.63	49.47	135.91
88.74	58.41	129.48	82.84	88.05	99.85	138.66	136.65	88.76	89.38	44.12
53.99	136.71	107.15	157.91	78.67	84.61	100.28	139.64	52.92	110.01	35.46
95.83	107.52	94.48	90.46	55.66	58.19	101.53	93.44	51.08	63.11	38.98
114.03	132.96	69.41	116.3	44.75	54.32	73.11	139.09	54.18	81.33	53.28
74.43	81.27	108.89	148.15	115.99	58.4	76.41	107.48	133.57	71.39	120.7
77.82	66.76	59.83	67.79	73.49	59.37	126.51	124.85	81.81	68.58	117.03
122.96	106.57	119.2	134.09	86.24	86.65	149.51	90.72	88.01	97.36	114.9
130.3	139.95	130.07	141.6	99.4	120.89	90.43	117.82	112.56	132.61	94.56
109.74	57.04	102.79	127.77	131.8	168.19	148.31	112.42	41.49	134.11	124.4
125.83	72.24	93.42	51.21	65.53	90.86	89.88	78.74	38.9	55.24	95.89
Середнє значення										
90.7348	92.57142	88.02598	103.4181	92.1348	103.4774	106.8354	91.72622	86.61236	89.3752	86.3485

Додаток Л

Дані розподілу щільності вірогідності вектору фази та логарифму відношення правдоподібності.

Гісто-грамний ряд	Значення W0, W1 та *ln*L для фази при обертах двигуна					
	1000			750		
	W0	W1	*ln*L	W0	W1	*ln*L
0	0	0	-2.3	0.000504	0	-2.7
2.5	0.002665	0	-2.3	0.003531	0	-2.7
5	0.01672	0	-3.374	0.000504	0	-2.7
7.5	0.03319	0.007158	-1.53402	0.0116	0	-2.7
10	0.07268	0.007158	-2.31784	0.07465	0.002465	-3.41062
12.5	0.2377	0.02434	-2.27889	0.2517	0.01048	-3.17877
15	0.03295	0.2256	1.923772	0.04994	0.1442	1.060379
17.5	0.004119	0.06958	2.826867	0.005044	0.1214	3.180891
20	0	0.05326	2.302585	0.002522	0.03698	2.685325
22.5	0	0.1	2.302585	0	0.07889	2.302585
25	0	0.002004	2.302585	0	0.001233	2.302585
27.5	0	0	2.302585	0	0.004314	2.302585
30	0	0	2.302585	0	0	2.302585

Додаток Н

Додаткові обчислення для визначення середнього значення та середньоквадратичного відхилення наробітку двигунів СМД-31А.

Інтервали	Частота, m_i	Сер.знач. інтерв. t_i	Нова випадкова величина t_i	$m_i \cdot t_i$	$m_i \cdot (t_i)^2$	Закон розподілу $f(t)$	Вірогідність інтервалів. P_{ti}	Теоретичні m_i
650 - 700	1	675	-7.00	-7	49	0.004125	0.001782031	0.093
700 - 750	0	725	-6.00	0	0	0.013874	0.005993314	0.312
750 - 800	0	775	-5.00	0	0	0.038719	0.016725537	0.870
800 - 850	1	825	-4.00	-4	16	0.089660	0.038730613	2.014
850 - 900	1	875	-3.00	-3	9	0.172280	0.074420046	3.870
900 - 950	1	925	-2.00	-2	4	0.274684	0.118655197	6.170
950 - 1000	6	975	-1.00	-6	6	0.363405	0.156980195	8.163
1000 - 1050	7	1025	–	–	–	0.398942	0.172331327	8.961
1050 - 1100	10	1075	1.00	10	10	0.363405	0.156980195	8.163
1100 - 1150	11	1125	2.00	22	44	0.274684	0.118655197	6.170
1150 - 1200	7	1175	3.00	21	63	0.172280	0.074420046	3.870
1200 - 1250	5	1225	4.00	20	80	0.089660	0.038730613	2.014
1250 - 1300	1	1275	5.00	5	25	0.038719	0.016725537	0.870
1300 - 1350	0	1325	6.00	0	0	0.013874	0.005993314	0.312
1350 - 1400	1	1375	7.00	7	49	0.004125	0.001782031	0.093
Всього	52			63	355			51.943

Додаток П

Результати розрахунку наробітку двигуна СМД-31А на інтервалі від -3σ до 3σ.

Фаза, град. п.к.в	Наробіток, м.-год.							Зазор, мм
	$T_{ср}+3\sigma$	$T_{ср}+2\sigma$	$T_{ср}+\sigma$	$T_{ср}$	$T_{ср}-\sigma$	$T_{ср}-2\sigma$	$T_{ср}-3\sigma$	
9	77.58	71.04	64.49	57.95	51.41	44.86	38.32	0.213
9.25	231.2	211.7	192.2	172.7	153.2	133.7	114.2	0.2335
9.5	363.2	332.6	301.9	271.3	240.7	210	179.4	0.254
9.75	475.4	435.3	395.2	355.1	315	274.9	234.8	0.2745
10	569.8	521.7	473.7	425.6	377.5	329.5	281.4	0.295
10.25	648.4	593.7	539	484.3	429.6	374.9	320.2	0.3155
10.5	713.3	653.1	593	532.8	472.6	412.5	352.3	0.336
10.75	766.6	701.9	637.3	572.6	507.9	443.3	378.6	0.3565
11	810	741.6	673.3	605	536.7	468.4	400	0.377
11.25	845.7	774.4	703	631.7	560.4	489	417.7	0.3975
11.5	875.7	801.8	728	654.1	580.2	506.4	432.5	0.418
11.75	901.9	825.9	749.8	673.7	597.6	521.5	445.5	0.4385
12	926.4	848.3	770.1	692	613.9	535.7	457.6	0.459
12.25	951.3	871.1	790.8	710.6	630.4	550.1	469.9	0.4795
12.5	978.5	896	813.4	730.9	648.4	565.8	483.3	0.5
12.75	1010	924.7	839.5	754.3	669.1	583.9	498.8	0.5205
13	1048	959.2	870.9	782.5	694.1	605.8	517.4	0.541
13.25	1094	1001	909.1	816.9	724.7	632.4	540.2	0.5615
13.5	1150	1053	956	859	762	665	568	0.582
13.75	1219	1116	1013	910.3	807.5	704.7	601.9	0.6025
14	1302	1192	1082	972.3	862.5	752.7	642.9	0.623
14.25	1402	1283	1165	1047	928.8	810.5	692.3	0.6435

Додаток Ж

Таблиця Ж.1

Дані хронометражу за результатами досліджень без ТО

Через дріб вказані час напрацювання на відмову, час відновлення, год									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,87/0,03	1,34/0,4	1,35/1,17	5,03/0,36	3,97/0,98	5,36/0,35	2,82/1,04	3,08/1,22	4,82/0,07	5,7/0,1
2,9/0,75	2,35/1,22	1,9/0,22	5,4/1,33	3,02/0,6	2,18/1,08	5,42/0,4	5,23/0,83	6,18/0,55	3,75/0,33
3,41/0,93	1,7/0,43	6,47/0,72	1,66/0,42	2/0,68	6,6/0,17	4,17/0,21	4,18/1,3	4,58/0,3	3,98/0,1
1,52/0,65	2,37/1,14	5,52/0,38	2,33/0,39	2,83/0,32	6,73/0,88	2,13/0,86	5,8/0,92	4,25/0,58	3,24/1,02
4,88/0,67	3,38/0,77	6,63/0,62	3,8/0,52	4,07/1,32	4,48/0,9	2,52/0,54	2,75/1,18	3,83/0,57	2,67/0,23
2,68/4.4	1,81/0,25	3,63/1,12	4,35/0,73	4,82/0,41	3,3/0,25	5,13/0,18	3,15/0,4	3,7/0,82	1,47/0,95

Таблиця Р.2

Оброблені дані по ЧБР без ТО

№ інтервала	Інтервал	Середина інтервалу	Частота m_i	Частість m_i/N	Щільність f_i
1	1,15 – 1,85	1,5	7	0,116	0,165
2	1,85 – 2,55	2,2	9	0,15	0,214
3	2,55 – 3,25	2,9	10	0,166	0,237
4	3,25 – 3,95	3,6	8	0,133	0,19
5	3,95 – 4,65	4,3	8	0,133	0,19
6	4,65 – 5,35	5	7	0,116	0,165
7	5,35 – 6,05	5,7	6	0,1	0,142
8	6,05 – 6,75	6,4	5	0,083	0,118

Таблиця Р.3

Оброблені дані по ЧВ без ТО

№ інтервала	Інтервал	Середина інтервалу	Частота m_i	Частість m_i/N	Щільність f_i
1	0,03 – 0,2	0,12	6	0,1	0,588
2	0,2 – 0,37	0,28	10	0,166	0,976
3	0,37 – 0,53	0,45	10	0,166	0,976
4	0,53 – 0,7	0,62	9	0,15	0,882
5	0,7 – 0,87	0,78	7	0,116	0,682
6	0,87 – 1,03	0,95	7	0,116	0,682
7	1,03 – 1,2	1,12	6	0,1	0,588
8	1,2 – 1,36	1,28	5	0,083	0,488

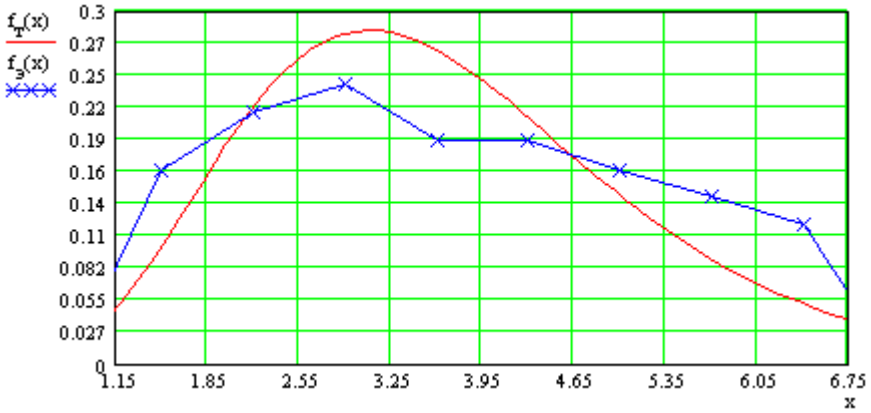


Рис. Р.1. Теоретична і емпірична криві щільності розподілу ЧБР без ТО

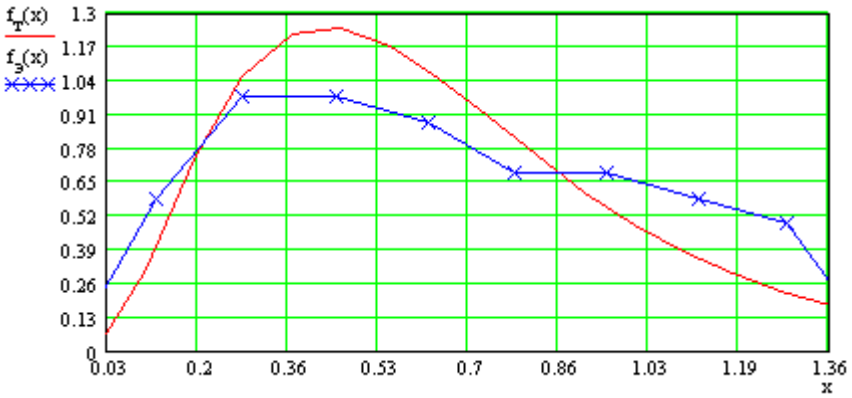


Рис. Р.2. Теоретична і емпірична криві щільності розподілу ЧВ без ТО

Таблиця Р.4

Експериментальні характеристики без ТО

Характеристики надійності	Матем. очікув. $\overline{X}$, ч	Дисп-я S^2, ч²	Коеф-т варіації V,%	Порядок закона Ерланга	Інтенсивність λ_i	Крит-й Пірсона $P(\chi^2)$	Коеф-т готовн.
Нарабіток	3,71	2,26	40,5	6	1,617	0,15	0,851
Відновлення	0,65	0,125	54,46	3	4,615	0,15	

Таблиця Р.5

Дані хронометражу за результатами досліджень з ТО

Через дріб вказані час напрацювання на відмову, час відновлення, год									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,87/0,13	3,34/0,6	6,35/0,27	4,03/0,47	2,97/0,08	4,35/0,45	3,81/0,14	5,08/0,32	3,82/0,17	4,7/0,2
3,9/0,85	5,35/1,02	7,3/0,32	6,4/0,63	2,02/0,7	5,18/0,19	4,42/0,5	4,23/0,63	2,78/0,65	1,75/0,33
2,41/1,01	2,7/0,53	2,47/0,82	1,96/0,52	7/0,77	4,6/0,27	3,17/0,31	3,18/0,34	3,58/0,4	5,91/0,22
2,52/0,75	4,37/0,24	4,55/0,48	5,33/0,49	4,83/0,41	3,73/0,98	7,13/0,87	4,8/0,32	3,25/0,68	5,25/0,12
3,88/0,77	2,38/0,87	2,63/0,72	2,8/0,62	3,07/0,4	3,48/1	6,52/0,64	5,75/0,28	6,33/0,67	4,67/0,28
7,01/0,65	2,88/0,35	5,63/0,21	3,85/0,83	3,72/0,51	2,3/0,35	4,13/0,28	6,15/0,51	3,7/0,82	5,47/0,76

Таблиця Р.6

Данні хронометражу по ТО

Зазначено тривалість / періодичність профілактики, (год)
0,16/4

Таблиця Р.7

Оброблені дані по ЧБР з ТО

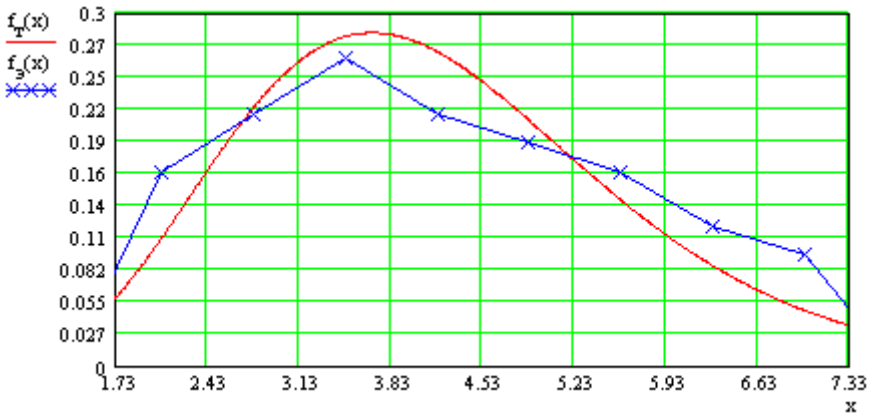
№ інтервала	Інтервал	Середина інтервалу	Частота m_i	Частість m_i/N	Щільність f_i
1	1,73 – 2,43	2,08	7	0,116	0,165
2	2,43 – 3,13	2,78	9	0,15	0,214
3	3,13 – 3,83	3,48	11	0,183	0,261
4	3,83 – 4,53	4,18	9	0,15	0,214
5	4,53 – 5,23	4,88	8	0,133	0,19
6	5,23 – 5,93	5,58	7	0,116	0,165
7	5,93 – 6,63	6,28	5	0,083	0,118
8	6,63 – 7,33	6,98	4	0,066	0,094

Таблиця Р.8

Оброблені дані по ЧВ з ТО

№ інтервала	Інтервал	Середина інтервалу	Частота m_i	Частість m_i/N	Щільність f_i
1	0,06 – 0,18	0,12	6	0,1	0,833
2	0,18 – 0,3	0,24	10	0,166	1,383
3	0,3 – 0,42	0,36	11	0,183	1,525
4	0,42 – 0,54	0,48	9	0,15	1,25
5	0,54 – 0,66	0,6	7	0,116	0,966
6	0,66 – 0,78	0,72	7	0,116	0,966
7	0,78 – 0,9	0,84	6	0,1	0,833
8	0,9 – 1,02	0,96	4	0,066	0,55

Рис. Р.3. Теоретична і емпірична криві щільності розподілу ЧБР з ТО



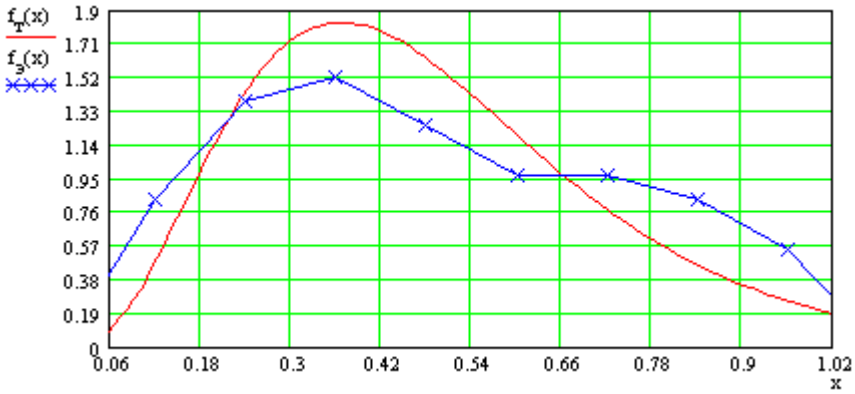


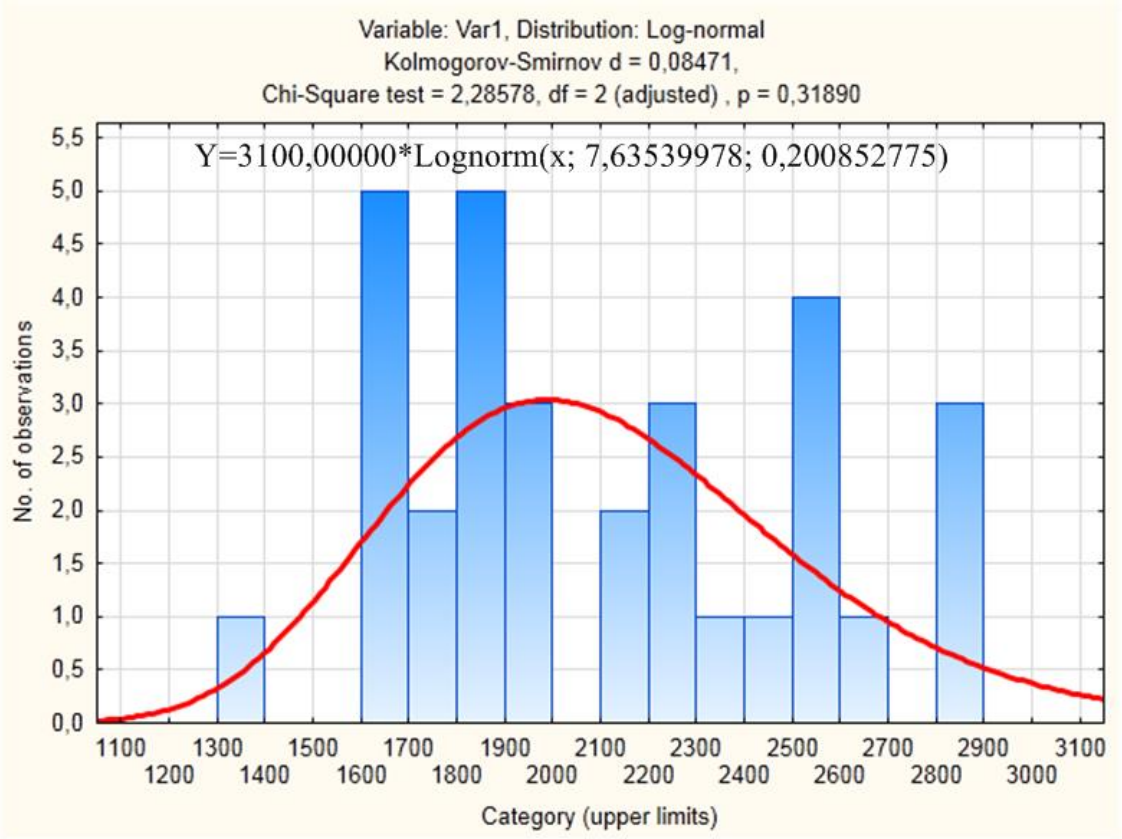
Рис. Р.4. Теоретична і емпірична криві щільності розподілу ЧВ з ТО

Таблиця Р.9

Експериментальні характеристики з ТО

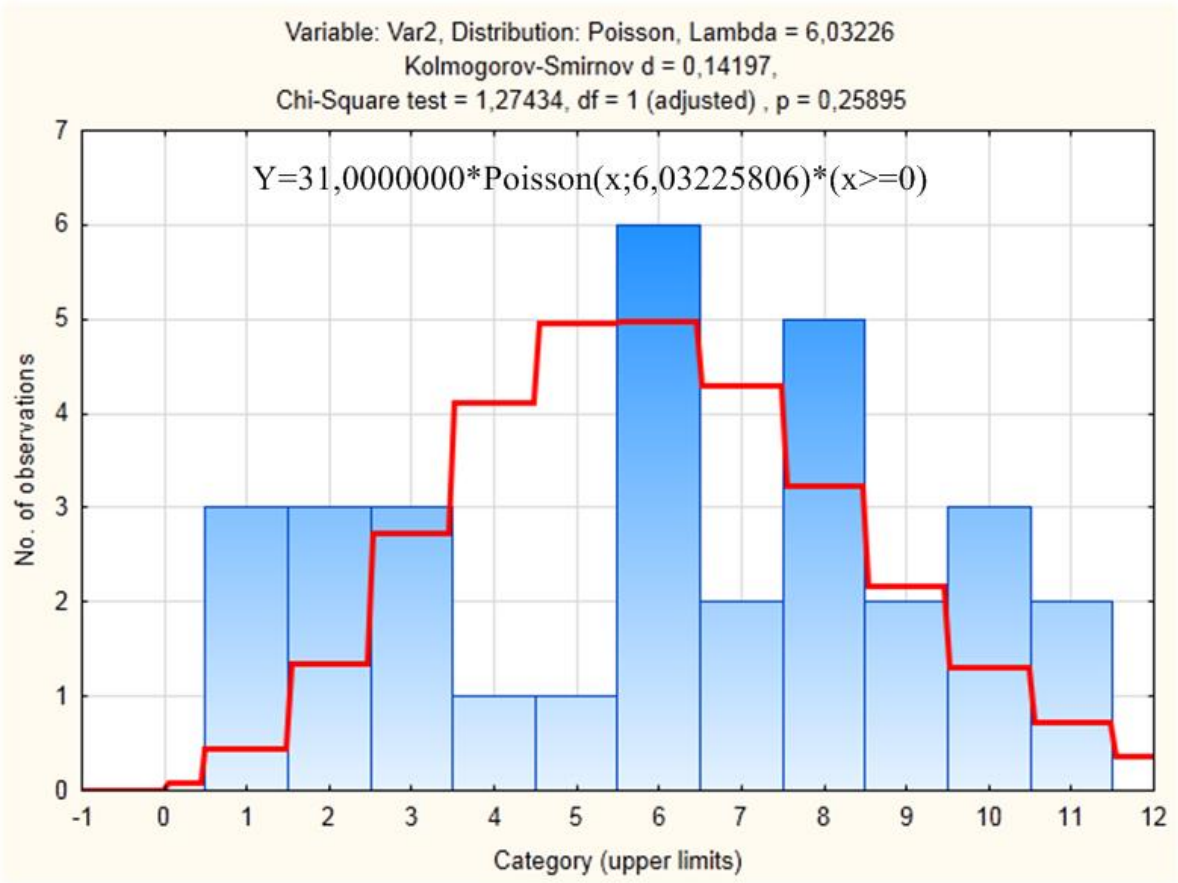
Характеристики надійності	Матем. очікув. $\overline{X}$, ч	Дисп-я S^2, ч²	Коеф-т варіації V,%	Порядок закона Ерланга	Інтенсивність λ_i	Крит-й Пірсона $P(\chi^2)$	Коеф-т готовн.
Нарабіток	4,21	2,081	34,2	8	1,9	0,15	0,867
Відновлення	0,49	0,061	50,5	4	8,163	0,15	
Профілактика	0,16						

Об’єм випадкової величини виконання робіт машин для лісотехнічних робіт за циклом



Upper Boundary	Variable: Var1, Distribution: Log-normal (Spreadsheet1.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,08471, Chi-Square = 2,28578, df = 2 (adjusted) , p = 0,31890								
	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 1200,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,102716	0,10272	0,331341	0,3313	-0,10272
1300,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,215495	0,31821	0,695144	1,0265	-0,21549
1400,00000	1	1	3,22581	3,2258	0,479543	0,79775	1,546914	2,5734	0,52046
1500,00000	0	1	0,00000	3,2258	0,887118	1,68487	2,861671	5,4351	-0,88712
1600,00000	0	1	0,00000	3,2258	1,408695	3,09357	4,544179	9,9792	-1,40870
1700,00000	5	6	16,12903	19,3548	1,969394	5,06296	6,352884	16,3321	3,03061
1800,00000	2	8	6,45161	25,8065	2,473579	7,53654	7,979286	24,3114	-0,47358
1900,00000	5	13	16,12903	41,9355	2,837352	10,37389	9,152748	33,4642	2,16265
2000,00000	3	16	9,67742	51,6129	3,012385	13,38628	9,717371	43,1815	-0,01239
2100,00000	0	16	0,00000	51,6129	2,993042	16,37932	9,654975	52,8365	-2,99304
2200,00000	2	18	6,45161	58,0645	2,808711	19,18803	9,060358	61,8969	-0,80871
2300,00000	3	21	9,67742	67,7419	2,508607	21,69664	8,092281	69,9892	0,49139
2400,00000	1	22	3,22581	70,9677	2,146378	23,84301	6,923800	76,9129	-1,14638
2500,00000	1	23	3,22581	74,1935	1,768961	25,61198	5,706325	82,6193	-0,76896
2600,00000	4	27	12,90323	87,0968	1,410942	27,02292	4,551427	87,1707	2,58906
2700,00000	1	28	3,22581	90,3226	1,093529	28,11645	3,527513	90,6982	-0,09353
2800,00000	0	28	0,00000	90,3226	0,826402	28,94285	2,665814	93,3640	-0,82640
2900,00000	3	31	9,67742	100,0000	0,610803	29,55365	1,970331	95,3344	2,38920
3000,00000	0	31	0,00000	100,0000	0,442686	29,99634	1,428021	96,7624	-0,44269
< Infinity	0	31	0,00000	100,0000	1,003662	31,00000	3,237620	100,0000	-1,00366

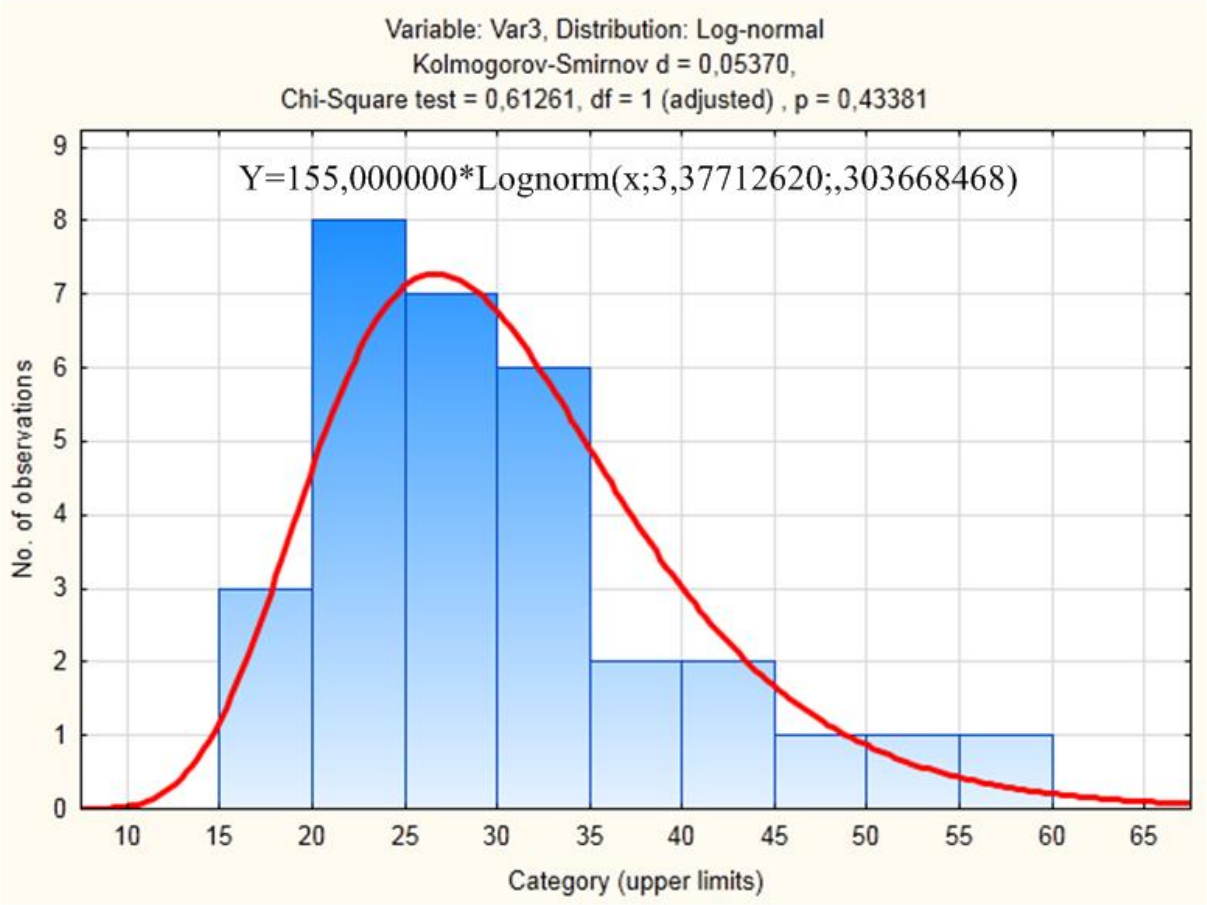
Кількість відмов за циклом



Variable: Var2, Distribution: Poisson, Lambda = 6,03226 (Spreadsheet1.sta)
Kolmogorov-Smirnov d = 0,14197,
Chi-Square = 1,27434, df = 1 (adjusted) , p = 0,25895

Category	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 0,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,074402	0,07440	0,24001	0,2400	-0,07440
1,00000	3	3	9,67742	9,6774	0,448813	0,52321	1,44778	1,6878	2,55119
2,00000	3	6	9,67742	19,3548	1,353677	1,87689	4,36670	6,0545	1,64632
3,00000	3	9	9,67742	29,0323	2,721910	4,59880	8,78036	14,8348	0,27809
4,00000	1	10	3,22581	32,2581	4,104816	8,70362	13,24134	28,0762	-3,10482
5,00000	1	11	3,22581	35,4839	4,952266	13,65588	15,97505	44,0512	-3,95227
6,00000	6	17	19,35484	54,8387	4,978887	18,63477	16,06093	60,1122	1,02111
7,00000	2	19	6,45161	61,2903	4,290559	22,92533	13,84051	73,9527	-2,29056
8,00000	5	24	16,12903	77,4194	3,235222	26,16055	10,43620	84,3889	1,76478
9,00000	2	26	6,45161	83,8710	2,168410	28,32896	6,99487	91,3838	-0,16841
10,00000	3	29	9,67742	93,5484	1,308040	29,63700	4,21949	95,6032	1,69196
< Infinity	2	31	6,45161	100,0000	1,362997	31,00000	4,39676	100,0000	0,63700

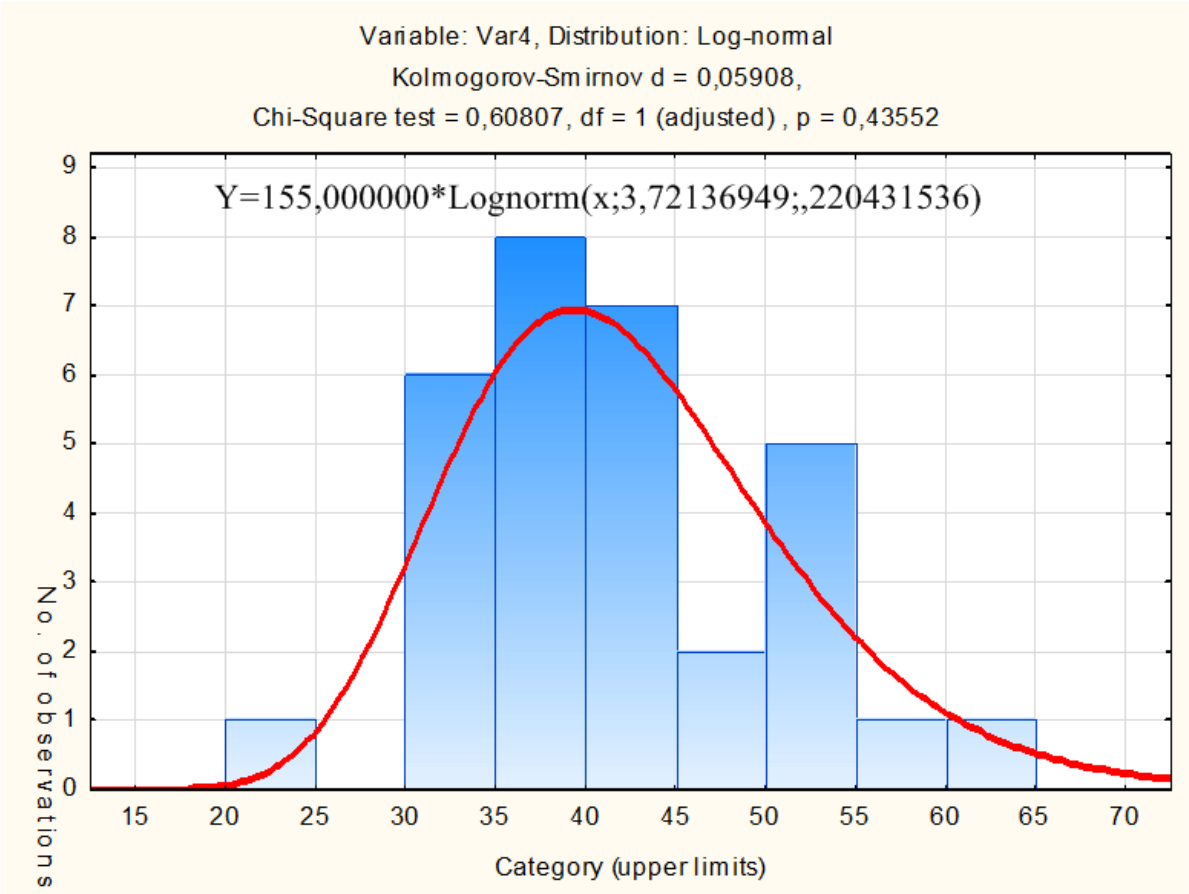
Кількість відмов ОЛК за циклом



Variable: Var3, Distribution: Log-normal (Spreadsheet1.sta)
Kolmogorov-Smirnov d = 0,05370,
Chi-Square = 0,61261, df = 1 (adjusted) , p = 0,43381

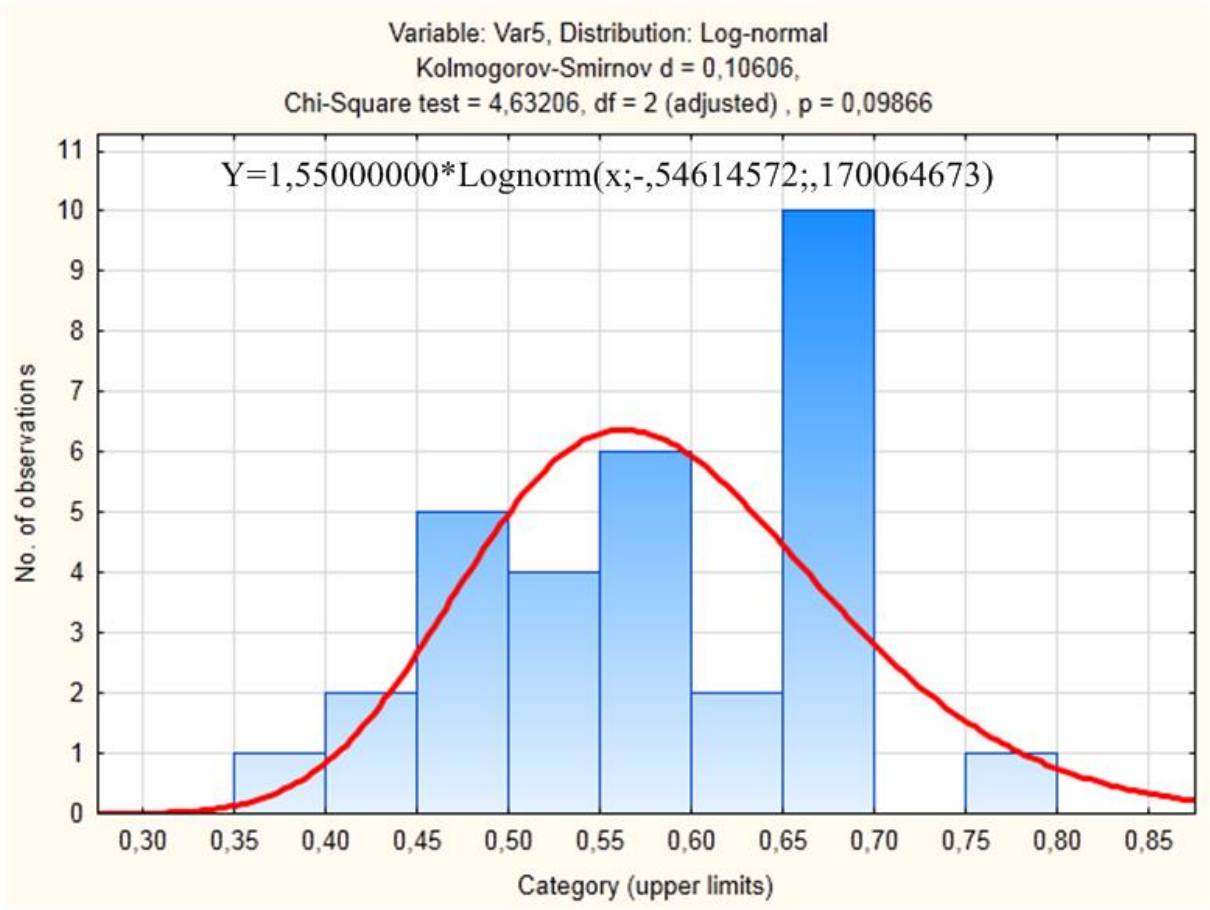
Upper Boundary	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 15,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,427379	0,42738	1,37864	1,3786	-0,42738
20,00000	3	3	9,67742	9,6774	2,814171	3,24155	9,07797	10,4566	0,18583
25,00000	8	11	25,80645	35,4839	6,093744	9,33529	19,65724	30,1139	1,90626
30,00000	7	18	22,58065	58,0645	7,144003	16,47930	23,04517	53,1590	-0,14400
35,00000	6	24	19,35484	77,4194	5,882964	22,36226	18,97730	72,1363	0,11704
40,00000	2	26	6,45161	83,8710	3,916474	26,27874	12,63379	84,7701	-1,91647
45,00000	2	28	6,45161	90,3226	2,284388	28,56312	7,36899	92,1391	-0,28439
50,00000	1	29	3,22581	93,5484	1,225361	29,78848	3,95278	96,0919	-0,22536
55,00000	1	30	3,22581	96,7742	0,623173	30,41166	2,01024	98,1021	0,37683
60,00000	1	31	3,22581	100,0000	0,306488	30,71815	0,98867	99,0908	0,69351
< Infinity	0	31	0,00000	100,0000	0,281854	31,00000	0,90921	100,0000	-0,28185

Кількість відмов автомобілів за циклом



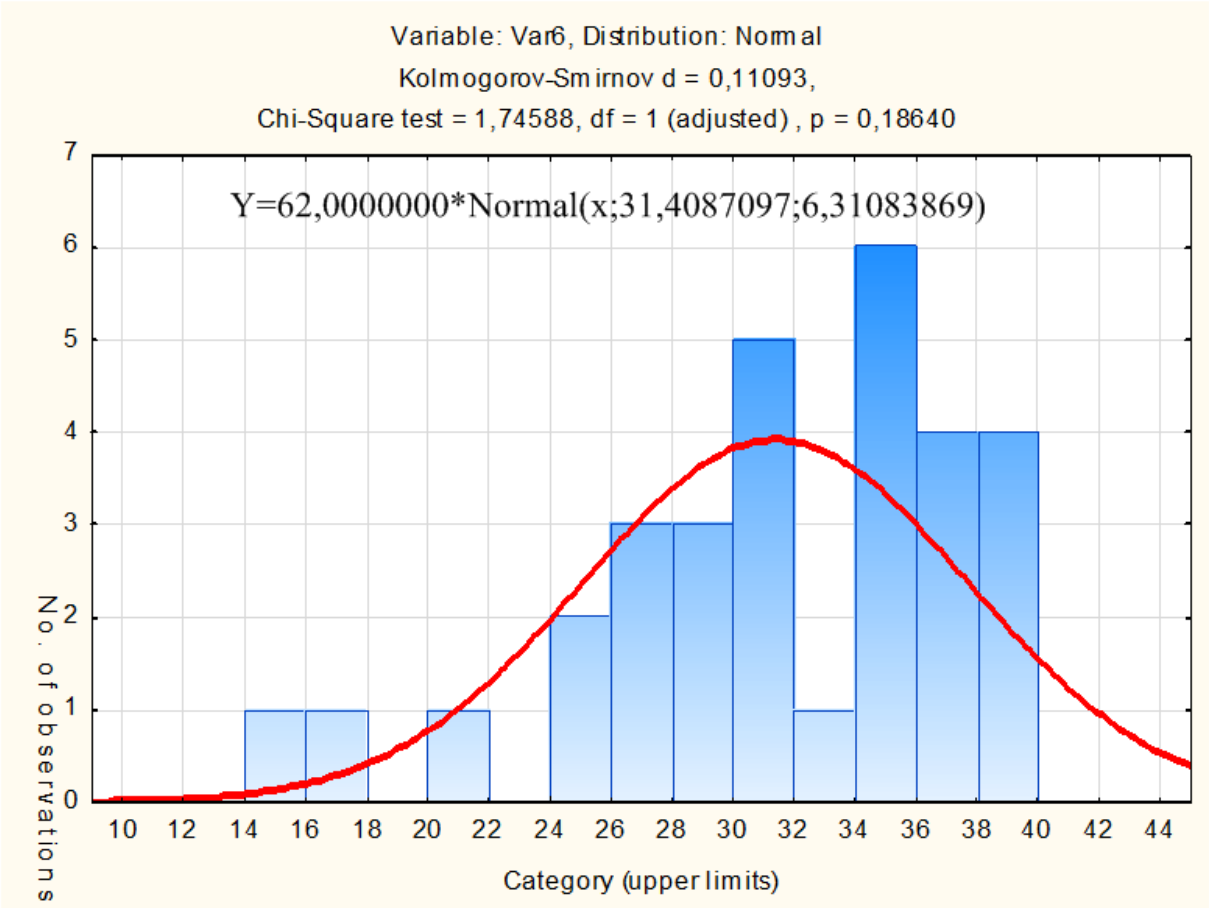
Upper Boundary	Variable: Var4, Distribution: Log-normal (Spreadsheet1.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,05908, Chi-Square = 0,60807, df = 1 (adjusted) , p = 0,43552								
	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 20,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,015425	0,01542	0,04976	0,0498	-0,01542
25,00000	1	1	3,22581	3,2258	0,335371	0,35080	1,08184	1,1316	0,66463
30,00000	0	1	0,00000	3,2258	1,917917	2,26871	6,18683	7,3184	-1,91792
35,00000	6	7	19,35484	22,5806	4,727220	6,99593	15,24910	22,5675	1,27278
40,00000	8	15	25,80645	48,3871	6,687808	13,68374	21,57357	44,1411	1,31219
45,00000	7	22	22,58065	70,9677	6,484810	20,16855	20,91874	65,0598	0,51519
50,00000	2	24	6,45161	77,4194	4,831586	25,00014	15,58576	80,6456	-2,83159
55,00000	5	29	16,12903	93,5484	2,984629	27,98476	9,62783	90,2734	2,01537
60,00000	1	30	3,22581	96,7742	1,610289	29,59505	5,19448	95,4679	-0,61029
65,00000	1	31	3,22581	100,0000	0,787032	30,38209	2,53881	98,0067	0,21297
< Infinity	0	31	0,00000	100,0000	0,617914	31,00000	1,99327	100,0000	-0,61791

Середня трудомісткість усунення відмов, люд-год



Upper Boundary	Variable: Var5, Distribution: Log-normal (Spreadsheet1.sta) Kolmogorov-Smirnov d = 0,10606, Chi-Square = 4,63206, df = 2 (adjusted) , p = 0,09866								
	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 0,35000	0	0	0,00000	0,0000	0,047425	0,04743	0,15298	0,1530	-0,04743
0,40000	1	1	3,22581	3,2258	0,410107	0,45753	1,32293	1,4759	0,58989
0,45000	2	3	6,45161	9,6774	1,678844	2,13638	5,41563	6,8915	0,32116
0,50000	5	8	16,12903	25,8065	3,867953	6,00433	12,47727	19,3688	1,13205
0,55000	4	12	12,90323	38,7097	5,793735	11,79806	18,68947	38,0583	-1,79374
0,60000	6	18	19,35484	58,0645	6,252090	18,05015	20,16803	58,2263	-0,25209
0,65000	2	20	6,45161	64,5161	5,237791	23,28795	16,89610	75,1224	-3,23779
0,70000	10	30	32,25806	96,7742	3,600960	26,88891	11,61600	86,7384	6,39904
0,75000	0	30	0,00000	96,7742	2,118381	29,00729	6,83349	93,5719	-2,11838
0,80000	1	31	3,22581	100,0000	1,101056	30,10834	3,55179	97,1237	-0,10106
< Infinity	0	31	0,00000	100,0000	0,891658	31,00000	2,87632	100,0000	-0,89166

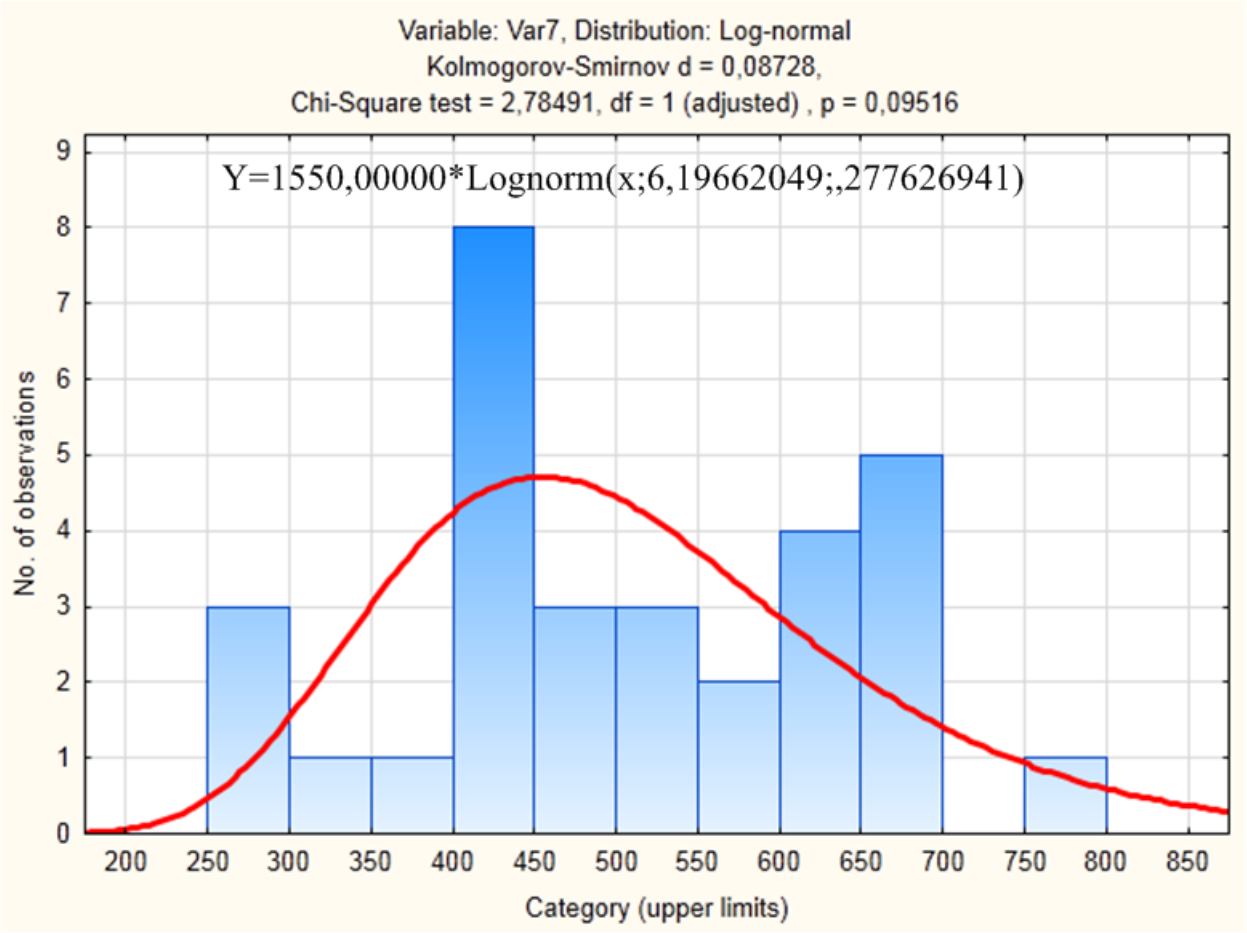
Сумарна трудомісткість РОЗ, люд.-год/цикл



Variable: Var6, Distribution: Normal (Spreadsheet1.sta)
Kolmogorov-Smirnov d = 0,11093,
Chi-Square = 1,74588, df = 1 (adjusted) , p = 0,18640

Upper Boundary	Observed Frequency	Cumulative Observed	Percent Observed	Cumul. % Observed	Expected Frequency	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumul. % Expected	Observed-Expected
<= 12,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,032578	0,03258	0,10509	0,1051	-0,03258
14,00000	0	0	0,00000	0,0000	0,057415	0,08999	0,18521	0,2903	-0,05741
16,00000	1	1	3,22581	3,2258	0,136637	0,22663	0,44076	0,7311	0,86336
18,00000	1	2	3,22581	6,4516	0,294336	0,52097	0,94947	1,6805	0,70566
20,00000	0	2	0,00000	6,4516	0,573927	1,09489	1,85138	3,5319	-0,57393
22,00000	1	3	3,22581	9,6774	1,012995	2,10789	3,26772	6,7996	-0,01299
24,00000	0	3	0,00000	9,6774	1,618447	3,72633	5,22080	12,0204	-1,61845
26,00000	2	5	6,45161	16,1290	2,340626	6,06696	7,55041	19,5708	-0,34063
28,00000	3	8	9,67742	25,8065	3,064143	9,13110	9,88433	29,4552	-0,06414
30,00000	3	11	9,67742	35,4839	3,631035	12,76214	11,71302	41,1682	-0,63104
32,00000	5	16	16,12903	51,6129	3,894907	16,65705	12,56422	53,7324	1,10509
34,00000	1	17	3,22581	54,8387	3,781892	20,43894	12,19965	65,9321	-2,78189
36,00000	6	23	19,35484	74,1935	3,324041	23,76298	10,72271	76,6548	2,67596
38,00000	4	27	12,90323	87,0968	2,644651	26,40763	8,53113	85,1859	1,35535
40,00000	4	31	12,90323	100,0000	1,904646	28,31228	6,14402	91,3299	2,09535
42,00000	0	31	0,00000	100,0000	1,241661	29,55394	4,00536	95,3353	-1,24166
< Infinity	0	31	0,00000	100,0000	1,446064	31,00000	4,66472	100,0000	-1,44606

Середній наробіток, мото-год



Додаток С

Програмний код Delphi 7 і Firebird 2.1 програмного комплексу системності прийняття рішення при управлінні періодичністю відновлення працездатності машин для лісотехнічних робі

Проект **FORESTMASHINERY** (Відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт v.1)

```
program ForestMashinery;

uses
  Forms,
  main in 'main.pas' {fMain},
  _DM in '_DM.pas' {dm: TDataModule},
  Zastavka in 'Zastavka.pas' {zast},
  ZAYAV in 'ZAYAV.pas' {fZAYAV},
  OnlyCode in 'OnlyCode.pas',
  pass in 'pass.pas' {_pass},
  Statistic in 'Statistic.pas' {fStatistic},
  SetingSystem in 'SetingSystem.pas' {FSetingSystem},
  about in 'about.pas' {FAbout},
  OneSystem in 'OneSystem.pas' {Form2},
  TwoSystem in 'TwoSystem.pas' {Form3},
  GR_ser_prib in 'GR_ser_prib.pas' {Form5},
  GR_ser_zatr in 'GR_ser_zatr.pas' {Form6},
  GR_KG in 'GR_KG.pas' {Form7};

{$R *.res}

begin
  Application.Initialize;
  Application.CreateForm(Tdm, dm);
  Application.CreateForm(TfMain, fMain);
  Application.Run;
end.
```

Головний модуль ForestMashinery

```
unit main;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, bsSkinData,
BusinessSkinForm, Grids, DBGridEh, DB, ADODB,  bsSkinCtrls, bsSkinGrids, bsDBGrids, XPMan, StdCtrls, Mask,
FIBDataSet, pFIBDataSet, bsDialogs, bsSkinMenus, ImgList, bsPngImageList,  Menus, bsSkinHint, ExtCtrls,
bsSkinBoxCtrls, bsSkinExCtrls, ComCtrls,  bsSkinTabs, bsMessages, IniFiles, bsSkinKeyComboBox,
bsSkinShellCtrls;

type
  TfMain = class(TForm)
    XPManifest1: TXPManifest;
    bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
    bsSkinData1: TbsSkinData;
    bsResourceStrData1: TbsResourceStrData;
    bsSkinPopupMenu1: TbsSkinPopupMenu;
    Documents1: TMenuItem;
    Newdocument1: TMenuItem;
    Op end ocument1: TMenuItem;
    N1: TMenuItem;
```

```
Save1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
Close1: TMenuItem;
Closeall1: TMenuItem;
N3: TMenuItem;
Selectskin1: TMenuItem;
N4: TMenuItem;
Exit1: TMenuItem;
bsPngImageList1: TbsPngImageList;
bsPngImageList2: TbsPngImageList;
bsPngImageList3: TbsPngImageList;
bsPngImageList4: TbsPngImageList;
bsSkinImagesMenu1: TbsSkinImagesMenu;
bsPngImageList5: TbsPngImageList;
bsSelectSkinDialog1: TbsSelectSkinDialog;
bsSkinMenuButton1: TbsSkinMenuButton;
bsSkinPageControl1: TbsSkinPageControl;
bsSkinTabSheet1: TbsSkinTabSheet;
bsSkinGroupBox1: TbsSkinGroupBox;
bsSkinGroupBox3: TbsSkinGroupBox;
bsSkinSpeedButton2: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinTabSheet2: TbsSkinTabSheet;
bsSkinGroupBox4: TbsSkinGroupBox;
bsSkinGroupBox5: TbsSkinGroupBox;
bsSkinTabSheet3: TbsSkinTabSheet;
bsSkinToolBar1: TbsSkinToolBar;
bsSkinSpeedButton4: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinSpeedButton5: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinSpeedButton6: TbsSkinSpeedButton;
bsCompressedSkinList1: TbsCompressedSkinList;
bsSkinSpeedButton3: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinStatusBar1: TbsSkinStatusBar;
bsSkinStatusPanel1: TbsSkinStatusPanel;
bsSkinStatusPanel2: TbsSkinStatusPanel;
bsSkinStatusPanel3: TbsSkinStatusPanel;
bsMessage: TbsSkinMessage;
bsSkinMDITabsBar1: TbsSkinMDITabsBar;
bsSkinBevel4: TbsSkinBevel;
bsSkinBevel5: TbsSkinBevel;
N5: TMenuItem;
bSetings: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinSpeedButton17: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinMenuSpeedButton1: TbsSkinMenuSpeedButton;
bsSkinPopupMenu2: TbsSkinPopupMenu;
N6: TMenuItem;
N7: TMenuItem;
bAbout: TMenuItem;
bsSkinOpendialog1: TbsSkinOpendialog;
bsSkinSaveDialog1: TbsSkinSaveDialog;
bsSkinHint1: TbsSkinHint;
ClearStat: TbsSkinSpeedButton;
ClearSolve: TbsSkinSpeedButton;
bsSkinStdLabel1: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel2: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel3: TbsSkinStdLabel;
procedure Selectskin1Click(Sender: TObject);
procedure bsSkinHint1ShowHint(var HintStr: String; var  CanShow: Boolean; var  HintInfo: THintInfo);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure bsSkinSpeedButton4Click(Sender: TObject);
procedure LoadSkins;
procedure saveCloseSeting;
procedure bsSkinSpeedButton5Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Exit1Click(Sender: TObject);
    procedure Close1Click(Sender: TObject);
    procedure Closeall1Click(Sender: TObject);
    procedure bSetingsClick(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
    procedure bAboutClick(Sender: TObject);
    procedure ClearStatClick(Sender: TObject);
    procedure ClearSolveClick(Sender: TObject);


  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }

  end;

type
  TRoleMode = (rSYSDBA, rADM, rOPERATOR);

type TCurrUser=record
  id : integer;
  name:string;
  Role: TRoleMode;
end;
var
  fMain: TfMain;
  curr_user: TCurrUser;
  LastZayavka, CurrZayavka:integer;
  hwndWindow:HWND;
  a:integer;
  VVV,VVV1,VVV2:real;

implementation

uses _DM, Zastavka,
  ZAYAV, pass, OnlyCode, Statistic,SetingSystem, about;

{$R *.dfm}

procedure TfMain.Selectskin1Click(Sender: TObject);
begin
  if bsSelectSkinDialog1.Execute(bsSkinData1.SkinIndex)
  then
    bsSkinData1.SkinIndex := bsSelectSkinDialog1.SelectedSkinIndex;
end;

procedure TfMain.bsSkinHint1ShowHint(var HintStr: String;
  var  CanShow: Boolean; var  HintInfo: THintInfo);
begin
  bsSkinStatusPanel3.Caption:= HintStr;
end;

procedure TfMain.FormCreate(Sender: TObject);
var
  i,j,cod:integer;  fname:string;  f:textfile;  KeyGood,Mod_res:Boolean; log,s,capt,Role:string; AUser, ARole,
DBName,DBPass: String; AppIni: TIniFile; Zastav         :Tzast;
   procedure Delay (Seconds,MilliSec:Word);
    var
      TimeOut :TDateTime;
    begin
      TimeOut:=Now+EncodeTime(0,Seconds div 60, Seconds mod 60, MilliSec);
```

```
      while Now < TimeOut do
        Application.ProcessMessages;
    end;
    procedure show_F(Zad:integer);
     var
     i:Integer;
     begin
       for i:=0 to 34 do begin
        Delay(0,Zad);
       end;
    end;

begin
  LoadSkins;  CurrZayavka:=0;
  if dm.pFIBDatabase1.Connected then dm.pFIBDatabase1.Connected:=false;
  dm.pFIBDatabase1.DBParams.Clear; AppIni:= TIniFile.Create(ExtractFileDir(Application.ExeName)+'\science.ini');
  with  AppIni do begin
    AUser:= ReadString('Database', 'LogId', ''); ARole:= ReadString('Database', 'LogRole', '');
    DBName:= ReadString('Database', 'ServerName', ''); DBPass:= ReadString('Database', 'LogPassword', '');
  end;
  AppIni.Free;
  dm.pFIBDatabase1.DBName:=DBName;
  with  T_pass.Create(nil) do
    try
      bsSkinEdit1.Text:=AUser; bsSkinPasswordEdit1.Text:=DBPass; ShowModal;
    finally
      if ModalResult=mrOk then begin
        if dm.pFIBDatabase1.DBName='' then
          dm.pFIBDatabase1.DBName:='FOREST';
        dm.pFIBDatabase1.DBParams.Add('user_name='+bsSkinEdit1.Text);
        dm.pFIBDatabase1.DBParams.Add('password='+bsSkinPasswordEdit1.Text);
        log:=bsSkinEdit1.Text;
        if (UpperCase(log)<>'SYSDBA') then begin
          if (UpperCase(log)='SYS') then
            ARole:='ADM';
          if ARole<>'' then
            dm.pFIBDatabase1.DBParams.Add('sql_role_name='+ARole);
        end else
          ARole:='';
        dm.pFIBDatabase1.DBParams.Add('lc_ctype=WIN1251');
        try
          dm.pFIBDatabase1.Connected:=true; curr_user.name:=bsSkinEdit1.Text;
          if ARole='' then
            curr_user.Role:= rSYSDBA;
          if ARole = 'ADM' then
            curr_user.Role:= rADM;
          if ARole = 'OPERATOR' then
            curr_user.Role:= rOPERATOR;
          Mod_res:=true;
        except
          Mod_res:=false;
        end;
      end else
        Mod_res:=false;
      free;
    end;

  if Mod_res then begin
    case  curr_user.Role of
      rSYSDBA : Caption:=Caption+' – [Користувач÷ (логін) - '+curr_user.name+', Посада – Головний адміністратор
(Власник БД)]';
      rADM : Caption:=Caption+' - – [Користувач÷ (логін)- '+curr_user.name+', , Посада - адмін]';
```

```
      rOPERATOR: Caption:=Caption+' - – [Користувач÷ (логін)- '+curr_user.name+', , Посада - оператор]';
    end;
     Zastav:= Tzast.Create(Application);  Zastav.Show; Zastav.Update; show_F(60); Screen.Cursor:=crDefault;
  end else begin
    Application.Terminate; close;
  end;
  if Zastav<>nil then
      Zastav.Timer1.Enabled:=True;
  indP:=0; dm.pq.SQL.Clear;
  dm.pq.SQL.Add('select v0, v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9 from readhisquery ');
  dm.pq.ExecQuery; i:=1;
  while not dm.pq.Eof do begin
    PXI[0,i]:=dm.pq.FieldByName('v0').Value; PXI[1,i]:=dm.pq.FieldByName('v1').Value;
    PXI[2,i]:=dm.pq.FieldByName('v2').Value; PXI[3,i]:=dm.pq.FieldByName('v3').Value;
    PXI[4,i]:=dm.pq.FieldByName('v4').Value; PXI[5,i]:=dm.pq.FieldByName('v5').Value;
    PXI[6,i]:=dm.pq.FieldByName('v6').Value; PXI[7,i]:=dm.pq.FieldByName('v7').Value;
    PXI[8,i]:=dm.pq.FieldByName('v8').Value; PXI[9,i]:=dm.pq.FieldByName('v9').Value;
    dm.pq.Next; inc(i);
  end;
  dm.pq.Close; fMain.WindowState:=wsMaximized; hwndWindow:=handle;
end;

procedure TfMain.bsSkinSpeedButton4Click(Sender: TObject);
begin
    CreateSTAT(‘Розрахунок характеристик’,fStatistic);
end;

procedure TfMain.LoadSkins;
var
  AppIni: TIniFile; skinsID, ind:integer; def:integer;
begin
  try
    AppIni:= TIniFile.Create(ExtractFileDir(Application.ExeName)+'\science.ini');
    with  AppIni do begin
      def:= ReadInteger('Setings','LoadInput',0);
      if def = 1 then begin
        skinsID:=ReadInteger('Common','SkinsOpen',0); bsSkinData1.SkinIndex :=skinsID;
        ind:=ReadInteger('Common','TabOpenIndex',0); bsSkinPageControl1.ActivePageIndex:= ind;
      end else begin
        skinsID:=ReadInteger('Default','SkinsOpen',0); bsSkinData1.SkinIndex :=skinsID;
        ind:=ReadInteger('Default','TabOpenIndex',0); bsSkinPageControl1.ActivePageIndex:= ind;
      end;
    end;
  finally
    AppIni.Free;
  end;
end;

procedure TfMain.bsSkinSpeedButton5Click(Sender: TObject);
begin
  CreateZAYAV(‘Статистика відмов',TfZAYAV, 0);
end;

procedure TfMain.Exit1Click(Sender: TObject);
begin  Close;end;

procedure TfMain.Close1Click(Sender: TObject);
var
  i: Integer; BS: TbsBusinessSkinForm;
begin
  ActiveMDIChild.Close;
end;
```

```
procedure TfMain.Closeall1Click(Sender: TObject);
begin
  bsBusinessSkinForm1.CloseAll;
end;

procedure TfMain.bSetingsClick(Sender: TObject);
begin
  with  TFSetingSystem.Create(nil) do
  try
    loadSeting; showModal;
  finally
    if modalResult= idOk then begin
      SaveSeting;
    end;
    free;
  end;
end;

procedure TfMain.saveCloseSeting;
var
  AppIni: TIniFile;  skinsID, ind:integer;  def:integer;
begin
  try
    AppIni:= TIniFile.Create(ExtractFileDir(Application.ExeName)+'\science.ini');
    with  AppIni do begin
      def:= ReadInteger('Setings','SaveSeting',0);
      if def = 1 then begin
        WriteInteger('Common','SkinsOpen',bsSkinData1.SkinIndex);
        WriteInteger('Common','TabOpenIndex',bsSkinPageControl1.ActivePageIndex);
      end;
      def:= ReadInteger('Setings','SaveLoginExit',0);
      if def = 1 then begin
        WriteString('Database','LogId',curr_user.name);
        case  curr_user.Role of
          rSYSDBA : WriteString('Database','LogRole',''); rADM : WriteString('Database','LogRole','ADM');
        rOPERATOR : WriteString('Database','LogRole','OPERATOR');
        end;
      end;
      AppIni.UpdateFile;
    end;
  finally
    AppIni.Free;
  end;
end;

procedure TfMain.FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
begin
  if bsMessage.MessageDlg(УВАГА!'+#13+'Ви бажаєте покинути програму - [Відновлення працездатності
лісових МЕЗ v.1]?',mtWarning,[mbYes, mbNo],0) = mrYes then begin
    saveCloseSeting;    Action := caFree;
  end else
    Action := caNone;
end;

procedure TfMain.bAboutClick(Sender: TObject);
begin
  with  TFAbout.Create(nil) do
  try
    showModal;
  finally
    free;
```

```
  end;
end;

procedure TfMain.ClearStatClick(Sender: TObject);
var i:integer;
    Child: TfStatistic;
begin
  with  fMain do
  for I := MDIChildCount-1 downto 0 do begin
    if MDIChildren[I].Name= 'fStatistic' then begin
      if MDIChildren[I] is TfStatistic then begin
        Child:= (MDIChildren[I] as TfStatistic);
        if Assigned(Child) then begin
          Child.inicial;
        end;
      end;
      break;
    end;
  end;
end;

procedure TfMain.ClearSolveClick(Sender: TObject);
var i:integer;
    Child: TfStatistic;
begin
  with  fMain do
  for I := MDIChildCount-1 downto 0 do begin
    if MDIChildren[I].Name= 'fStatistic' then begin
      if MDIChildren[I] is TfStatistic then begin
        Child:= (MDIChildren[I] as TfStatistic);
        if Assigned(Child) then begin
          Child.inicial1;
        end;
      end;
      break;
    end;
  end;
end;

end.
```

Модуль Статистика відмов

```
unit ZAYAV;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, BusinessSkinForm, ComCtrls,
bsSkinTabs,_DM, main, DB,  FIBDataSet,  pFIBDataSet, StdCtrls, Mask, bsSkinBoxCtrls, bsdbctrls, bsSkinCtrls,
bsSkinGrids, bsDBGrids, bsMessages, ImgList, bsPngImageList, Grids,  DBGrids, DBCtrls, ExtCtrls;

type
  TfZAYAV = class(TForm)
    bsSkinPanel2: TbsSkinPanel;
    bsSkinSplitter1: TbsSkinSplitter;
    bsSkinStdLabel1: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinPanel1: TbsSkinPanel;
    bsSkinStdLabel4: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinGroupBox1: TbsSkinGroupBox;
    bsSkinStdLabel2: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinStdLabel3: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinStdLabel5: TbsSkinStdLabel;
```

```
bsSkinStdLabel6: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel7: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel8: TbsSkinStdLabel;
Edit3: TbsSkinEdit;
Edit4: TbsSkinEdit;
Edit5: TbsSkinEdit;
Edit6: TbsSkinEdit;
Edit7: TbsSkinEdit;
Button2: TbsSkinButton;
Button3: TbsSkinButton;
bsSkinCheckRadioBox1: TbsSkinCheckRadioBox;
Button1: TbsSkinButton;
Edit1: TbsSkinEdit;
Edit2: TbsSkinEdit;
StatisticButton: TbsSkinButton;
SaveButton: TbsSkinButton;
bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
bsMessage: TbsSkinMessage;
ImageList1: TbsPngImageList;
bsSkinStdLabel9: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel10: TbsSkinStdLabel;
bsSkinPanel3: TbsSkinPanel;
bsSkinSplitter2: TbsSkinSplitter;
bsSkinPanel4: TbsSkinPanel;
bsSkinCheckRadioBox2: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinGroupBox2: TbsSkinGroupBox;
bsSkinStdLabel13: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel15: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel16: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel17: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel18: TbsSkinStdLabel;
edit8: TbsSkinEdit;
edit9: TbsSkinEdit;
edit10: TbsSkinEdit;
edit11: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel11: TbsSkinStdLabel;
StringGrid1: TbsSkinStringGrid;
bsSkinStdLabel12: TbsSkinStdLabel;
StringGrid2: TbsSkinStringGrid;
bsSkinStdLabel19: TbsSkinStdLabel;
StringGrid3: TbsSkinStringGrid;
bsSkinStdLabel20: TbsSkinStdLabel;
StringGrid4: TbsSkinStringGrid;
bsSkinButton2: TbsSkinButton;
bsSkinButton3: TbsSkinButton;
bsSkinPanel5: TbsSkinPanel;
bsSkinSplitter3: TbsSkinSplitter;
bsSkinStdLabel21: TbsSkinStdLabel;
edit12: TbsSkinEdit;
bsSkinGroupBox3: TbsSkinGroupBox;
bsSkinStdLabel22: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel24: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel25: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel26: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel27: TbsSkinStdLabel;
edit13: TbsSkinEdit;
edit14: TbsSkinEdit;
edit15: TbsSkinEdit;
edit16: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel28: TbsSkinStdLabel;
StringGrid5: TbsSkinStringGrid;
bsSkinStdLabel29: TbsSkinStdLabel;
```

```
  StringGrid6: TbsSkinStringGrid;
  bsSkinButton4: TbsSkinButton;
  bsSkinButton5: TbsSkinButton;
  bsSkinStdLabel30: TbsSkinStdLabel;
  edit17: TbsSkinEdit;
  bsSkinGroupBox4: TbsSkinGroupBox;
  bsSkinStdLabel31: TbsSkinStdLabel;
  edit18: TbsSkinEdit;
  bsSkinStdLabel32: TbsSkinStdLabel;
  edit19: TbsSkinEdit;
  bsSkinStdLabel33: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinStdLabel34: TbsSkinStdLabel;
  edit20: TbsSkinEdit;
  bsSkinStdLabel35: TbsSkinStdLabel;
  edit21: TbsSkinEdit;
  bsSkinStdLabel36: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinButton6: TbsSkinButton;
  bsSkinStdLabel37: TbsSkinStdLabel;
  edit22: TbsSkinEdit;
  bsSkinStdLabel38: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinButton7: TbsSkinButton;
  StringGrid7: TbsSkinStringGrid;
  bsSkinStdLabel39: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinStdLabel14: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinSpeedButton1: TbsSkinSpeedButton;
  procedure FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
  procedure Button3Click(Sender: TObject);
  procedure StatisticButtonClick(Sender: TObject);
  procedure SaveButtonClick(Sender: TObject);
  procedure bsSkinCheckRadioBox2Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinCheckRadioBox1Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton4Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton3Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton5Click(Sender: TObject);
  procedure Edit1KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit2KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit3KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit4KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit5KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit6KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit8KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit9KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit10KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit11KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit13KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit14KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit15KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit16KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit18KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit19KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit20KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure edit21KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure bsSkinButton6Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton7Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);

private
  { Private declarations }
public
```

```
    { Public declarations }
  end;

var
  fZAYAV: TfZAYAV;
  www:HWnd;

implementation

uses OnlyCode, OneSystem, TwoSystem;

{$R *.dfm}

procedure TfZAYAV.FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
begin
  Action := caFree;
end;

procedure TfZAYAV.Button1Click(Sender: TObject);
var cod:integer;    vr:real;
begin
  if a<>1 then begin
    ind:=0;    ind1:=0;    ind2:=0
  end;
  val(edit1.Text,vr,cod);  st:=vr; val(edit2.Text,vr,cod);  st:=st+vr/60;
end;

procedure TfZAYAV.Button2Click(Sender: TObject);
var cod:integer;    vr,VVBR:real;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    SetLength(MVBR,1000);    SetLength(MVV,1000);    inc(ind); val(edit3.Text,vr,cod);    VVBR:=vr;
val(edit4.Text,vr,cod);
    VVBR:=VVBR+vr/60;    if (ind=1) or (a=1) then
      MVBR[ind-1]:=VVBR-st
    else
      MVBR[ind-1]:=VVBR-VVV;
    if a=1 then
  a:=2; val(edit5.Text,vr,cod); VVV:=vr; val(edit6.Text,vr,cod); VVV:=VVV+vr/60; MVV[ind-1]:=VVV-VVBR;
edit7.Text:=inttostr(ind);
  end;
end;

procedure TfZAYAV.Button3Click(Sender: TObject);
var i:integer;    s:string;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    stringgrid1.ColCount:=ind; stringgrid2.ColCount:=ind; SetLength(MVBR,ind); SetLength(MVV,ind);
    for i:=0 to ind-1 do begin
      str(MVBR[i]:1:3,s); stringgrid1.cells[i,0]:=s; str(MVV[i]:1:3,s); stringgrid2.cells[i,0]:=s;
    end;
    str(ind,s); edit7.Text:=s;
  end;
end;

procedure TfZAYAV.StatisticButtonClick(Sender: TObject);
var f:textfile;    i,cod:integer;    s,fname:string;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    if fMain.bsSkinOpendialog1.Execute then begin
      fname:=fMain.bsSkinOpendialog1.FileName;
      AssignFile(f,fname);  Reset(f); readln(f,s); val(s,ind,cod); setlength(MVBR,ind); setlength(MVV,ind);
```

```
      for i:=0 to ind-1 do begin
        readln(f,s); val(s,MVBR[i],cod);
      end;
      for i:=0 to ind-1 do begin
        readln(f,s); val(s,MVV[i],cod);
      end;
      CloseFile(f);
    end;
  end else begin
  if fMain.bsSkinOpendialog1.Execute then begin
    fname:=fMain.bsSkinOpendialog1.FileName;
    AssignFile(f,fname); Reset(f); readln(f,s); val(s,ind1,cod);setlength(MVBR1,ind1);setlength(MVV1,ind1);
    for i:=0 to ind1-1 do begin
      readln(f,s); val(s,MVBR1[i],cod);
    end;
    for i:=0 to ind1-1 do begin
      readln(f,s); val(s,MVV1[i],cod);
    end;
    readln(f,s); val(s,ind2,cod); setlength(MVBR2,ind2);setlength(MVV2,ind2);
    for i:=0 to ind2-1 do begin
      readln(f,s); val(s,MVBR2[i],cod);
    end;
    for i:=0 to ind2-1 do
      begin
        readln(f,s); val(s,MVV2[i],cod);
      end;
      CloseFile(f);
    end;
  end;
  a:=1;
end;

procedure TfZAYAV.SaveButtonClick(Sender: TObject);
var f:textfile;    i:integer;    s,fname:string;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    if fMain.bsSkinSaveDialog1.Execute then begin
      fname:=fMain.bsSkinSaveDialog1.FileName; AssignFile(f,fname); Rewrite(f);str(ind,s); writeln(f,s);
      for i:=0 to ind-1 do begin
        str(MVBR[i]:1:3,s); writeln(f,s);
      end;
      for i:=0 to ind-1 do begin
        str(MVV[i]:1:3,s);writeln(f,s);
      end;
      CloseFile(f);
    end;
  end else begin
    if fMain.bsSkinSaveDialog1.Execute then begin
      fname:=fMain.bsSkinSaveDialog1.FileName; AssignFile(f,fname);Rewrite(f); str(ind1,s); writeln(f,s);
      for i:=0 to ind1-1 do begin
        str(MVBR1[i]:1:3,s);writeln(f,s);
      end;
      for i:=0 to ind1-1 do begin
        str(MVV1[i]:1:3,s);writeln(f,s);
      end;
      str(ind2,s);writeln(f,s);
      for i:=0 to ind2-1 do begin
        str(MVBR2[i]:1:3,s);writeln(f,s);
      end;
      for i:=0 to ind2-1 do begin
        str(MVV2[i]:1:3,s);writeln(f,s);
      end;
```

```
      CloseFile(f);
    end;
  end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinCheckRadioBox2Click(Sender: TObject);
begin
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    bsSkinCheckRadioBox1.Checked:= false;
  end else begin
    bsSkinCheckRadioBox1.Checked:= true;
  end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinCheckRadioBox1Click(Sender: TObject);
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    bsSkinCheckRadioBox2.Checked:= false;
  end else begin
    bsSkinCheckRadioBox2.Checked:= true;
  end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
var cod:integer;    vr,VVBR:real;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    SetLength(MVBR1,1000); SetLength(MVV1,1000); inc(ind1); val(edit8.Text,vr,cod);VVBR:=vr;
val(edit9.Text,vr,cod);
    VVBR:=VVBR+vr/60;
    if (ind1=1)or(a=1) then
      MVBR1[ind1-1]:=VVBR-st
    else
      MVBR1[ind1-1]:=VVBR-VVV1;
    if a=1 then
      a:=2; val(edit10.Text,vr,cod);VVV1:=vr;val(edit11.Text,vr,cod);VVV1:=VVV1+vr/60;MVV1[ind1-1]:=VVV1-
VVBR;
    edit12.Text:=inttostr(ind1);
  end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton4Click(Sender: TObject);
var cod:integer;    vr,VVBR:real;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin

SetLength(MVBR2,1000);SetLength(MVV2,1000);inc(ind2);val(edit13.Text,vr,cod);VVBR:=vr;val(edit14.Text,vr,cod
);
    VVBR:=VVBR+vr/60;
    if (ind2=1)or(a=1) then
      MVBR2[ind2-1]:=VVBR-st
    else
      MVBR2[ind2-1]:=VVBR-VVV2;
    if a=1 then
      a:=2;val(edit15.Text,vr,cod);VVV2:=vr;val(edit16.Text,vr,cod);VVV2:=VVV2+vr/60;MVV2[ind2-1]:=VVV2-
VVBR;
    edit17.Text:=inttostr(ind2);
  end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton3Click(Sender: TObject);
var i:integer;    s:string;
```

```
begin
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    stringgrid3.ColCount:=ind1;stringgrid4.ColCount:=ind1;SetLength(MVBR1,ind1);SetLength(MVV1,ind1);
    for i:=0 to ind1-1 do begin
      str(MVBR1[i]:1:3,s);stringgrid3.cells[i,0]:=s;str(MVV1[i]:1:3,s);stringgrid4.cells[i,0]:=s;
    end;
   str(ind1,s);edit12.Text:=s;
end;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton5Click(Sender: TObject);
var i:integer;    s:string;
begin
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    stringgrid5.ColCount:=ind2;stringgrid6.ColCount:=ind2;SetLength(MVBR2,ind2);SetLength(MVV2,ind2);
    for i:=0 to ind2-1 do begin
      str(MVBR2[i]:1:3,s); stringgrid5.cells[i,0]:=s; str(MVV2[i]:1:3,s); stringgrid6.cells[i,0]:=s;
    end;
    str(ind2,s);edit17.Text:=s;
  end;
end;

procedure TfZAYAV.Edit1KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.Edit2KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.Edit3KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.Edit4KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.Edit5KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.Edit6KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit8KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit9KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit10KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit11KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit13KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit14KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit15KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit16KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
```

```
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit18KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit19KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit20KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.edit21KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin  if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton6Click(Sender: TObject);
var cod:integer;    vr,VVBR,VVP:real;
begin
SetLength(MVP,1000);indP:=indP+1;val(edit18.Text,vr,cod);VVBR:=vr;val(edit19.Text,vr,cod);VVBR:=VVBR+vr/60
;
val(edit20.Text,vr,cod);VVP:=vr;val(edit21.Text,vr,cod);VVP:=VVP+vr/60;MVP[indP-1]:=VVP-
VVBR;edit22.Text:=inttostr(indP);
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinButton7Click(Sender: TObject);
var i:integer;    s:string;
begin
  stringgrid7.ColCount:=indP;
  SetLength(MVP,indP);
  for i:=0 to indP-1 do begin
    str(MVP[i]:1:3,s); stringgrid7.cells[i,0]:=s;
  end;
  str(indP,s); edit22.Text:=s;
end;

procedure TfZAYAV.bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);
begin
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
     with  TForm2.Create(self) do
     try
       showModal;
     finally
       free;
     end;
  end else begin
    with  TForm3.Create(self) do
     try
       showModal;
     finally
       free;
    end;
  end;
end;

end.
```

Модуль «Однокомпонентна система»

```
unit OneSystem;

interface

uses
```

```
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, BusinessSkinForm,
bsSkinCtrls, StdCtrls, Mask, bsSkinBoxCtrls,  bsSkinGrids;

type
  TForm2 = class(TForm)
    bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
    bsSkinGroupBox1: TbsSkinGroupBox;
    Edit7: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel1: TbsSkinLabel;
    Edit8: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel2: TbsSkinLabel;
    bsSkinLabel3: TbsSkinLabel;
    Edit9: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel4: TbsSkinLabel;
    Edit10: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel5: TbsSkinLabel;
    Edit6: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel6: TbsSkinLabel;
    Edit1: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel7: TbsSkinLabel;
    Edit2: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel8: TbsSkinLabel;
    Edit3: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel9: TbsSkinLabel;
    Edit4: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel10: TbsSkinLabel;
    Edit5: TbsSkinEdit;
    StringGrid2: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel11: TbsSkinLabel;
    bsSkinPanel1: TbsSkinPanel;
    bsSkinStdLabel1: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinStdLabel2: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinPanel2: TbsSkinPanel;
    bsSkinCheckRadioBox1: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinCheckRadioBox2: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinStdLabel3: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinLabel12: TbsSkinLabel;
    Edit11: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel13: TbsSkinLabel;
    Edit12: TbsSkinEdit;
    StringGrid4: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel14: TbsSkinLabel;
    Edit13: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel15: TbsSkinLabel;
    Edit14: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel16: TbsSkinLabel;
    Edit15: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel17: TbsSkinLabel;
    Edit16: TbsSkinEdit;
    bsSkinGroupBox3: TbsSkinGroupBox;
    bsSkinLabel18: TbsSkinLabel;
    Edit33: TbsSkinEdit;
    bsSkinButton1: TbsSkinButton;
    bsSkinGroupBox2: TbsSkinGroupBox;
    bsSkinStdLabel4: TbsSkinStdLabel;
    Edit23: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel19: TbsSkinLabel;
    Edit24: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel20: TbsSkinLabel;
    bsSkinLabel21: TbsSkinLabel;
    Edit25: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel22: TbsSkinLabel;
```

```
    Edit26: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel23: TbsSkinLabel;
    Edit22: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel24: TbsSkinLabel;
    Edit17: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel25: TbsSkinLabel;
    Edit18: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel26: TbsSkinLabel;
    Edit19: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel27: TbsSkinLabel;
    Edit20: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel28: TbsSkinLabel;
    Edit21: TbsSkinEdit;
    StringGrid1: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel29: TbsSkinLabel;
    bsSkinPanel3: TbsSkinPanel;
    bsSkinStdLabel5: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinStdLabel6: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinPanel4: TbsSkinPanel;
    bsSkinCheckRadioBox3: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinCheckRadioBox4: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinLabel30: TbsSkinLabel;
    Edit27: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel31: TbsSkinLabel;
    Edit28: TbsSkinEdit;
    StringGrid3: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel32: TbsSkinLabel;
    Edit29: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel33: TbsSkinLabel;
    Edit30: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel34: TbsSkinLabel;
    Edit31: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel35: TbsSkinLabel;
    Edit32: TbsSkinEdit;
    bsSkinButton2: TbsSkinButton;
    bsSkinSpeedButton1: TbsSkinSpeedButton;
    procedure bsSkinButton1Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    procedure bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
    procedure bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form2: TForm2;
  ch1:integer;

implementation

uses main, ZAYAV, OnlyCode, math, _DM;

{$R *.dfm}

procedure TForm2.bsSkinButton1Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer;    d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real;    min,max,fn:double;    v,h:extended;    s:string;  mas:
DataArray;    k1,k2,k3,k4:extended;
begin
  MeanAndStdDev(MVBR,moVBR,skoVBr);
  if moVBR=0 then begin
```

```
    if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введено дані! Поверніться і введіть вхідні дані. ', mtError, [mbYes], 0) =
          mrYes then
    exit;
  end;
  str(moVBR:1:3,s); edit7.Text:=s;str(skoVBR:1:3,s);edit8.Text:=s;v:=100*skoVBR/moVBR;str(v:1:3,s);edit9.Text:=s;
  h:=v/sqrt(ind);str(h:1:3,s);edit10.Text:=s;nChBR:=trunc(moVBR*moVBR/(skoVBR*skoVBR));str(nChBR,s);
  edit11.Text:=s;LVBR:=nChBR/moVBR;str(LVBR:1:6,s);edit12.Text:=s;
  if ind>100 then begin
    fc:=5*log10(ind);
    if fc>trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
  str(f,s);edit1.text:=s;max:=MaxValue(MVBR);  min:=MinValue(MVBR);colInterval[1]:=f;   STdError[1]:=
skoVBR/sqrt(ind);maxim[1]:=max; minim[1]:=min;    setLength(mas,length(MVBR));
  for i:=0 to ind-1 do       mas[i]:= MVBR[i];
  mediana[1]:= median(mas,ind);   dispersiya[1]:=IntPower(moVBR,2);
MomentSkewKurtosis(MVBR,k1,k2,k3,k4,assimetr[1],excess[1]);str(max:1:3,s);  edit2.text:=s;  str(min:1:3,s);
  edit3.text:=s;  d:=(max-min)/f; shirInterval[1]:=d;   str(d:1:3,s);  edit4.text:=s;
  if d=0 then    fn:=0
  else
    fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then f:=f+1;  str(f,s);  edit5.text:=s;
  setlength(Q_empir,f);setlength(Q_teorD,f);setlength(Q_teorDReal,f);setlength(Q_teorN,f);m:=min;Mi:=0;Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_empir[i]:=0;    Q_teorN[i]:=0;    Q_teorD[i]:=0;    Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind-1 do begin
      if (MVBR[j]>=m) and (MVBR[j]<=m+d) then begin
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1;        Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi;
    m:=m+d;Mi:=0;
  end;
  str(Mmax,s);edit6.Text:=s;stringgrid2.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_empir[i],s);    stringgrid2.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorN[i]:=exp( (t-moVBR)*(t-moVBR)/(-2*skoVBR*skoVBR) )/(skoVBR*sqrt(2*Pi));
      t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind*d*Q_teorN[i]); Q_teorDReal[i]:=ind*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,1,1,0,max,moVBR,skoVBR,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nChBR,LVBR,t,Q_teorN[i]);
```

```
      t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind*d*Q_teorN[i]);Q_teorDReal[i]:=ind*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,1,2,nChBR,max,0,0,LVBR);
  end;
  stringgrid4.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_teorD[i],s);    stringgrid4.cells[i,0]:=s;
  end;
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i];k:=f-3;  str(Xi:1:3,s);  edit13.Text:=s;  str(k,s);
edit14.Text:=s;  i:=1;
  while i<=14 do begin
              if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i];      i:=14;
    end;
    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s);edit15.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit16.Text:='не суперечить'
  else
    edit16.Text:='суперечить';
  Chi_square[1]:= Xi;df[1]:=k;ppp[1]:= P;Razmah[1]:= (maxim[1]-minim[1])/2;SumaM[1]:= SUM(MVBR);
  Chast(Q_empir,Q_teorDReal,1,min,d);
end;

procedure TForm2.FormActivate(Sender: TObject);
var
  s:string;
begin
  if MVP = nil then
    SetLength(MVP,1000); moVP:=Mean(MVP);  str(moVP:1:3,s);  edit33.Text:=s;
end;

procedure TForm2.bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer;    d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real;    min,max,fn:double;    v,h:extended;    s:string;
    mas: DataArray;       k1,k2,k3,k4:extended;
begin
    MeanAndStdDev(MVV,moVV,skoVV);
  if moVV=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введено вхідні дані! Поверніться, введіть дані.', mtError, [mbYes], 0) =
mrYes then       exit;
  end;
  str(moVV:1:3,s);  edit23.Text:=s;str(skoVV:1:3,s);  edit24.Text:=s;v:=100*skoVV/moVV;  str(v:1:3,s);
edit25.Text:=s;  h:=v/sqrt(ind);str(h:1:3,s);  edit26.Text:=s;  nCHV:=trunc(moVV*moVV/(skoVV*skoVV));
  str(nCHV,s);  edit27.Text:=s;  LVV:=nCHV/moVV;str(LVV:1:6,s);  edit28.Text:=s;
  if ind>100 then begin
    fc:=5*log10(ind);
    if fc>trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
```

```
  str(f,s);  edit17.text:=s;  max:=MaxValue(MVV);min:=MinValue(MVV);  colInterval[2]:=f;STdError[2]:=
skoVV/sqrt(ind);
   maxim[2]:=max; minim[2]:=min;    setLength(mas,length(MVV));
  for i:=0 to ind-1 do       mas[i]:= MVV[i];     mediana[2]:= median(mas,ind);   dispersiya[2]:=IntPower(moVV,2);
MomentSkewKurtosis(MVV,k1,k2,k3,k4,assimetr[2],excess[2]);str(max:1:3,s);  edit18.text:=s;  str(min:1:3,s);
edit19.text:=s;
  if f=0 then    d:=0
  else
    d:=(max-min)/f;  shirInterval[2]:=d;   str(d:1:3,s);  edit20.text:=s;
  if d=0 then
    fn:=0
  else
    fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then
    f:=f+1; str(f,s); edit21.text:=s; setlength(Q_empir,f);  setlength(Q_teorD,f);  setlength(Q_teorDReal,f);
setlength(Q_teorN,f);m:=min;  Mi:=0;  Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do
  begin Q_empir[i]:=0;
        Q_teorN[i]:=0; Q_teorD[i]:=0; Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind-1 do begin
      if (MVV[j]>=m) and (MVV[j]<=m+d) then begin
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1; Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi;
    m:=m+d;Mi:=0;
  end;
  str(Mmax,s);  edit22.Text:=s;  stringgrid1.Colcount:=f;  for i:=0 to f-1 do
  begin
    str(Q_empir[i],s); stringgrid1.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox3.Checked then begin
    fmax:=0; t:=min+d/2; k:=0;
    for i:=0 to f-1 do
    begin
      Q_teorN[i]:=exp( (t-moVV)*(t-moVV)/(-2*skoVV*skoVV) )/(skoVV*sqrt(2*Pi)); t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i]; k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind*d*Q_teorN[i]);      Q_teorDReal[i]:=ind*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,2,1,0,max,moVV,skoVV,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox4.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nCHV,LVV,t,Q_teorN[i]);      t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i]; k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind*d*Q_teorN[i]);  Q_teorDReal[i]:=ind*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,2,2,nCHV,max,0,0,LVV);
  end;
  stringgrid3.Colcount:=f;
```

```
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_teorD[i],s);stringgrid3.cells[i,0]:=s;
  end;
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i];k:=f-
3;str(Xi:1:3,s);edit29.Text:=s;str(k,s);edit30.Text:=s; i:=1;
  while i<=14 do begin
  if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i]; i:=14;
    end;
    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s); edit31.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit32.Text:='не суперечить'
  else
    edit32.Text:='суперечить';
  Chi_square[2]:= Xi;  df[2]:=k;  ppp[2]:= P; Razmah[2]:= (maxim[2]-minim[2])/2;  SumaM[2]:= SUM(MVV);
  Chast(Q_empir,Q_teorDReal,2,min,d);
end;

procedure TForm2.bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);
var
 zakon, gipoteza,i,j,k, p:integer;
begin
  if moVBR=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Розрахунок не проведено! Проведіть розрахунок і спробуйте знову.',
mtError, [mbYes], 0) = mrYes then  exit;
  end;

  if dm._a.Active then
    dm._a.Close;
  dm._a.SelectSQL.Clear;
  dm._a.SelectSQL.Add('execute block returns (MO double precision,SKO double precision,variaciya double precision,
colInterval integer, maxim double precision, minim double precision, shirInterval double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('STdError double precision, mediana double precision, dispersiya double precision, assimetr
double precision, excess double precision, Chi_square double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('p double precision, df integer, Razmah double precision, Suma double precision, zakon
integer, gipoteza integer, name var char(50)) as begin end');
  dm._a.CacheOpen;
  if (dm._a.Active) then
    if (dm._a.IsEmpty) then begin
      if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[1]>0.05 then
        gipoteza:= 1 //не суперечить
      else
        gipoteza:= 0; //суперечить
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19],
         [moVBR,skoVBR,(skoVBR/moVBR),colInterval[1], maxim[1], minim[1],shirInterval[1],
          STdError[1],mediana[1],dispersiya[1],assimetr[1],excess[1],
          Chi_square[1],ppp[1],df[1],Razmah[1],SumaM[1], zakon, gipoteza,
          'Статистика відмов ЧБР'], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
      if bsSkinCheckRadioBox3.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[2]>0.05 then
        gipoteza:= 1 //не суперечить
```

```
      else
        gipoteza:= 0;  //суперечить
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19],
         [moVV,skoVV,(skoVV/moVV), colInterval[2], maxim[2], minim[2],shirInterval[2],
          STdError[2],mediana[2],dispersiya[2],assimetr[2],excess[2],
          Chi_square[2],ppp[2],df[2],Razmah[2],SumaM[2], zakon, gipoteza,
          'Статистика відмов ЧВ'], 2);
    end;
    { 0- MO,1-SKO,2-variaciya,3-colInterval, 4-maxim,5-minim,6-shirInterval,7-STdError,8-mediana,
    9-dispersiya,10-assimetr,11-excess,12-Chi_square,13-p,14-df,15-Razmah,16-SumaM, 17zakon,
    18 - gipoteza, 19 -name}
  if dm._b.Active then
    dm._b.Close;
  dm._b.SelectSQL.Clear;
  dm._b.SelectSQL.Add('execute block returns (p1 var char(50),e1 integer,Ne2 integer, pre double precision, Npre
double precision, t1 double precision, Nt1 double precision,');
  dm._b.SelectSQL.Add('prT double precision, NprT double precision, raznica double precision, groups integer,centr
double precision) as beginend');
  dm._b.CacheOpen;
  if dm._c.Active then
    dm._c.Close;
  dm._c.SelectSQL.Clear;
  dm._c.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._c.CacheOpen;
  if dm._d.Active then
    dm._d.Close;
  dm._d.SelectSQL.Clear;
  dm._d.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._d.CacheOpen;
  if Chastots[2,1].p1<>'' then  p:=2  else p:=1;
  if (dm._b.Active) then
    if (dm._b.IsEmpty) then begin
      for i:=1 to p do begin
        k:=0;
        for ch1:=1 to 20 do begin
          inc(k);
          if Chastots[i,ch1].p1='' then
            break
          else
            continue;
        end;
        for j:=1 to k-1 do begin
          dm._b.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12],
            [Chastots[i,j].p1,Chastots[i,j].e1,Chastots[i,j].Ne2,Chastots[i,j].pre,Chastots[i,j].Npre,
             Chastots[i,j].t1,Chastots[i,j].Nt1, Chastots[i,j].prT, Chastots[i,j].NprT,
             Chastots[i,j].raznica,i,Chastots[i,j].centr], 2);
        end;
      end;
    end;
      for i:=1 to 30 do begin
        dm._c.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[1,i].x, ZakonR[1,i].y, 1],2);
        dm._d.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[2,i].x, ZakonR[2,i].y, 2],2);
      end;
    GenerateReport('statistik_1komp.fr3');
    dm.frxReport1.ShowReport;
end;
end.
```

Модуль «Двокомпонентна система»

```
unit TwoSystem;

interface
```

```
uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, BusinessSkinForm,
bsSkinCtrls, bsSkinGrids, StdCtrls, Mask,  bsSkinBoxCtrls;

type
  TForm3 = class(TForm)
    bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
    bsSkinExPanel1: TbsSkinExPanel;
    bsSkinStdLabel3: TbsSkinStdLabel;
    Edit7: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel1: TbsSkinLabel;
    Edit8: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel2: TbsSkinLabel;
    bsSkinLabel3: TbsSkinLabel;
    Edit9: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel4: TbsSkinLabel;
    Edit10: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel5: TbsSkinLabel;
    Edit6: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel6: TbsSkinLabel;
    Edit1: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel7: TbsSkinLabel;
    Edit2: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel8: TbsSkinLabel;
    Edit3: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel9: TbsSkinLabel;
    Edit4: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel10: TbsSkinLabel;
    Edit5: TbsSkinEdit;
    StringGrid2: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel11: TbsSkinLabel;
    bsSkinPanel1: TbsSkinPanel;
    bsSkinStdLabel1: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinStdLabel2: TbsSkinStdLabel;
    bsSkinPanel2: TbsSkinPanel;
    bsSkinCheckRadioBox1: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinCheckRadioBox2: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinLabel12: TbsSkinLabel;
    Edit11: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel13: TbsSkinLabel;
    Edit12: TbsSkinEdit;
    StringGrid4: TbsSkinStringGrid;
    bsSkinLabel14: TbsSkinLabel;
    Edit13: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel15: TbsSkinLabel;
    Edit14: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel16: TbsSkinLabel;
    bsSkinLabel17: TbsSkinLabel;
    Edit16: TbsSkinEdit;
    bsSkinExPanel2: TbsSkinExPanel;
    bsSkinStdLabel7: TbsSkinStdLabel;
    Edit23: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel35: TbsSkinLabel;
    Edit24: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel36: TbsSkinLabel;
    bsSkinLabel37: TbsSkinLabel;
    Edit25: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel38: TbsSkinLabel;
    Edit26: TbsSkinEdit;
    bsSkinLabel39: TbsSkinLabel;
    Edit22: TbsSkinEdit;
```

bsSkinLabel40: TbsSkinLabel;
Edit17: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel41: TbsSkinLabel;
Edit18: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel42: TbsSkinLabel;
Edit19: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel43: TbsSkinLabel;
Edit20: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel44: TbsSkinLabel;
Edit21: TbsSkinEdit;
StringGrid1: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel45: TbsSkinLabel;
bsSkinPanel5: TbsSkinPanel;
bsSkinStdLabel8: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel9: TbsSkinStdLabel;
bsSkinPanel6: TbsSkinPanel;
bsSkinCheckRadioBox5: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinCheckRadioBox6: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinLabel46: TbsSkinLabel;
Edit27: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel47: TbsSkinLabel;
Edit28: TbsSkinEdit;
StringGrid3: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel48: TbsSkinLabel;
Edit29: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel49: TbsSkinLabel;
Edit30: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel50: TbsSkinLabel;
Edit31: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel51: TbsSkinLabel;
Edit32: TbsSkinEdit;
bsSkinButton2: TbsSkinButton;
bsSkinExPanel3: TbsSkinExPanel;
bsSkinExPanel4: TbsSkinExPanel;
bsSkinStdLabel4: TbsSkinStdLabel;
Edit39: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel18: TbsSkinLabel;
Edit40: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel19: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel20: TbsSkinLabel;
Edit41: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel21: TbsSkinLabel;
Edit42: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel22: TbsSkinLabel;
Edit38: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel23: TbsSkinLabel;
Edit33: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel24: TbsSkinLabel;
Edit34: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel25: TbsSkinLabel;
Edit35: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel26: TbsSkinLabel;
Edit36: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel27: TbsSkinLabel;
Edit37: TbsSkinEdit;
StringGrid5: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel28: TbsSkinLabel;
bsSkinPanel3: TbsSkinPanel;
bsSkinStdLabel5: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel6: TbsSkinStdLabel;
bsSkinPanel4: TbsSkinPanel;
bsSkinCheckRadioBox3: TbsSkinCheckRadioBox;

bsSkinCheckRadioBox4: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinLabel29: TbsSkinLabel;
Edit43: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel30: TbsSkinLabel;
Edit44: TbsSkinEdit;
StringGrid6: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel31: TbsSkinLabel;
Edit45: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel32: TbsSkinLabel;
Edit46: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel33: TbsSkinLabel;
Edit47: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel34: TbsSkinLabel;
Edit48: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel10: TbsSkinStdLabel;
Edit55: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel52: TbsSkinLabel;
Edit56: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel53: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel54: TbsSkinLabel;
Edit57: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel55: TbsSkinLabel;
Edit58: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel56: TbsSkinLabel;
Edit54: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel57: TbsSkinLabel;
Edit49: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel58: TbsSkinLabel;
Edit50: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel59: TbsSkinLabel;
Edit51: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel60: TbsSkinLabel;
Edit52: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel61: TbsSkinLabel;
Edit53: TbsSkinEdit;
StringGrid7: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel62: TbsSkinLabel;
bsSkinPanel7: TbsSkinPanel;
bsSkinStdLabel11: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel12: TbsSkinStdLabel;
bsSkinPanel8: TbsSkinPanel;
bsSkinCheckRadioBox7: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinCheckRadioBox8: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinLabel63: TbsSkinLabel;
Edit59: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel64: TbsSkinLabel;
Edit60: TbsSkinEdit;
StringGrid8: TbsSkinStringGrid;
bsSkinLabel65: TbsSkinLabel;
Edit61: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel66: TbsSkinLabel;
Edit62: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel67: TbsSkinLabel;
Edit63: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel68: TbsSkinLabel;
Edit64: TbsSkinEdit;
ButtonChV2: TbsSkinButton;
ButtonChBR2: TbsSkinButton;
bsSkinButton1: TbsSkinButton;
bsSkinGroupBox3: TbsSkinGroupBox;
bsSkinLabel69: TbsSkinLabel;
Edit65: TbsSkinEdit;

```
    Edit15: TbsSkinEdit;
    bsSkinSpeedButton1: TbsSkinSpeedButton;
    procedure bsSkinButton1Click(Sender: TObject);
    procedure bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
    procedure ButtonChBR2Click(Sender: TObject);
    procedure ButtonChV2Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    procedure bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form3: TForm3;
  ch2:integer;

implementation

uses main, OnlyCode, ZAYAV, Math, _DM;

{$R *.dfm}

procedure TForm3.bsSkinButton1Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer; d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real; min,max,fn:double; v,h:extended;
    s:string; mas: DataArray; k1,k2,k3,k4:extended;
begin
  MeanAndStdDev(MVBR1,moVBR1,skoVBR1);
  if moVBR1=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і повторіть спробу.', mtError, [mbYes], 0)
=
            mrYes then  exit;
  end;
  str(moVBR1:1:3,s);  edit7.Text:=s; str(skoVBR1:1:3,s);  edit8.Text:=s; v:=100*skoVBR1/moVBR1;  str(v:1:3,s);
edit9.Text:=s;  h:=v/sqrt(ind1); str(h:1:3,s);  edit10.Text:=s;
nChBR1:=trunc(moVBR1*moVBR1/(skoVBR1*skoVBR1));
  str(nChBR1,s);  edit11.Text:=s; LVBR1:=nChBR1/moVBR1; str(LVBR1:1:6,s);  edit12.Text:=s;
  if ind1>100 then begin
    fc:=5*log10(ind1);
    if fc>trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind1);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
  str(f,s);  edit1.text:=s;  max:=MaxValue(MVBR1);  min:=MinValue(MVBR1); colInterval[1]:=f;  STdError[1]:=
skoVBR1/sqrt(ind1);   maxim[1]:=max; minim[1]:=min;  setLength(mas,length(MVBR1));
  for i:=0 to ind1-1 do
    mas[i]:= MVBR1[i];    mediana[1]:= median(mas,ind1);   dispersiya[1]:=IntPower(moVBR1,2);
  MomentSkewKurtosis(MVBR1,k1,k2,k3,k4,assimetr[1],excess[1]);str(max:1:3,s);  edit2.text:=s;  str(min:1:3,s);
edit3.text:=s;  d:=(max-min)/f; shirInterval[1]:=d;   str(d:1:3,s);  edit4.text:=s;  fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then
    f:=f+1; str(f,s); edit5.text:=s; setlength(Q_empir,f);  setlength(Q_teorD,f);  setlength(Q_teorDReal,f);
setlength(Q_teorN,f); m:=min;Mi:=0;Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_empir[i]:=0;    Q_teorN[i]:=0;    Q_teorD[i]:=0;    Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind1-1 do begin
      if (MVBR1[j]>=m) and (MVBR1[j]<=m+d) then begin
```

```
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1;
        Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi;
    m:=m+d;Mi:=0;
  end;
  str(Mmax,s);  edit6.Text:=s;  stringgrid2.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do
  begin
    str(Q_empir[i],s);    stringgrid2.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorN[i]:=exp( (t-moVBR1)*(t-moVBR1)/(-2*skoVBR1*skoVBR1) )/(skoVBR1*sqrt(2*Pi));   t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind1*d*Q_teorN[i]);      Q_teorDReal[i]:=ind1*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,1,1,0,max,moVBR1,skoVBR1,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox2.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nChBR1,LVBR1,t,Q_teorN[i]);
      t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind1*d*Q_teorN[i]); Q_teorDReal[i]:=ind1*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,1,2,nChBR1,max,0,0,LVBR1);
  end;
  stringgrid4.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do
  begin
    str(Q_teorD[i],s);
    stringgrid4.cells[i,0]:=s;
  end;
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i];k:=f-3;  str(Xi:1:3,s);  edit13.Text:=s;  str(k,s);
edit14.Text:=s;  i:=1;
  while i<=14 do begin
  if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i];      i:=14;    end;
    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s);
  edit15.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit16.Text:='Не суперечить'
  else
    edit16.Text:='Суперечить';
  Chi_square[1]:= Xi; df[1]:=k;  ppp[1]:= P;  Razmah[1]:= (maxim[1]-minim[1])/2;  SumaM[1]:= SUM(MVBR1);
```

```
  Chast(Q_empir,Q_teorDReal,1,min,d);
end;

procedure TForm3.bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer;
    d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real;
    min,max,fn:double;
    v,h:extended;
    s:string;
    mas: DataArray;
    k1,k2,k3,k4:extended;
begin
  MeanAndStdDev(MVV1,moVV1,skoVV1);
  if moVV1=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і повторіть спробу.', mtError, [mbYes], 0)
=
            mrYes then
      exit;
  end;
  str(moVV1:1:3,s);  edit23.Text:=s;  str(skoVV1:1:3,s);  edit24.Text:=s;  v:=100*skoVV1/moVV1; str(v:1:3,s);
edit25.Text:=s;  h:=v/sqrt(ind1);  str(h:1:3,s);  edit26.Text:=s; nCHV1:=trunc(moVV1*moVV1/(skoVV1*skoVV1));
  str(nCHV1,s);  edit27.Text:=s;  LVV1:=nCHV1/moVV1;  str(LVV1:1:6,s); edit28.Text:=s;
  if ind1>100 then begin
    fc:=5*log10(ind1);
    if fc>trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind1);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
  str(f,s);  edit17.text:=s;  max:=MaxValue(MVV1);  min:=MinValue(MVV1); colInterval[2]:=f;   STdError[2]:=
skoVV1/sqrt(ind1);   maxim[2]:=max; minim[2]:=min; setLength(mas,length(MVV1));
  for i:=0 to ind1-1 do
    mas[i]:= MVV1[i];   mediana[2]:= median(mas,ind1);   dispersiya[2]:=IntPower(moVV1,2);
MomentSkewKurtosis(MVV1,k1,k2,k3,k4,assimetr[2],excess[2]); str(max:1:3,s);  edit18.text:=s;  str(min:1:3,s);
edit19.text:=s;  d:=(max-min)/f;  shirInterval[2]:=d; str(d:1:3,s);  edit20.text:=s;  fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then
    f:=f+1;  str(f,s); edit21.text:=s;  setlength(Q_empir,f);  setlength(Q_teorD,f);  setlength(Q_teorDReal,f);
setlength(Q_teorN,f); m:=min;Mi:=0;Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_empir[i]:=0;    Q_teorN[i]:=0;    Q_teorD[i]:=0;    Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind1-1 do begin
      if (MVV1[j]>=m) and (MVV1[j]<=m+d) then begin
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1;        Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi; m:=m+d;Mi:=0;
  end;
  str(Mmax,s);  edit22.Text:=s;  stringgrid1.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_empir[i],s);    stringgrid1.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox5.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorN[i]:=exp( (t-moVV1)*(t-moVV1)/(-2*skoVV1*skoVV1) )/(skoVV1*sqrt(2*Pi));
      t:=t+d;
    if Q_teorN[i]>fmax then begin
```

```
      fmax:=Q_teorN[i];k:=i
    end;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_teorD[i]:=round(ind1*d*Q_teorN[i]);    Q_teorDReal[i]:=ind1*d*Q_teorN[i];
  end;
  Raspredeleniye(ZakonR,2,1,0,max,moVV1,skoVV1,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox6.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nCHV1,LVV1,t,Q_teorN[i]);
      t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind1*d*Q_teorN[i]);      Q_teorDReal[i]:=ind1*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,2,2,nCHV1,max,0,0,LVV1);
  end;
  stringgrid3.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_teorD[i],s);    stringgrid3.cells[i,0]:=s;
  end;
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i]; k:=f-3;  str(Xi:1:3,s);  edit29.Text:=s;  str(k,s);
edit30.Text:=s;  i:=1;
  while i<=14 do begin
  if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i]; i:=14;
    end;
    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s);
  edit31.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit32.Text:='Не суперечить'
  else
    edit32.Text:='Суперечить';
  Chi_square[2]:= Xi;  df[2]:=k;  ppp[2]:= P;  Razmah[2]:= (maxim[2]-minim[2])/2; SumaM[2]:= SUM(MVV1);
Chast(Q_empir,Q_teorDReal,2,min,d);
end;

procedure TForm3.ButtonChBR2Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer;    d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real;    min,max,fn:double;
    v,h:extended;    s:string;    mas: DataArray;    k1,k2,k3,k4:extended;
begin
  MeanAndStdDev(MVBR2,moVBR2,skoVBR2);
  if moVBR2=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введено вхідні дані! Поверніться, введіть вхідні дані і повторіть спробу.',
mtError, [mbYes], 0) = mrYes then
      exit;
  end;
  str(moVBR2:1:3,s);  edit39.Text:=s;  str(skoVBR2:1:3,s);  edit40.Text:=s; v:=100*skoVBR2/moVBR2;  str(v:1:3,s);
edit41.Text:=s;  h:=v/sqrt(ind2); str(h:1:3,s);  edit42.Text:=s;
nChBR2:=trunc(moVBR2*moVBR2/(skoVBR2*skoVBR2));
  str(nChBR2,s);  edit43.Text:=s;  LVBR2:=nChBR2/moVBR2;  str(LVBR2:1:6,s); edit44.Text:=s;
  if ind2>100 then begin
    fc:=5*log10(ind2);
```

```
    if fc>trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind2);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
  str(f,s);  edit33.text:=s;  max:=MaxValue(MVBR2);  min:=MinValue(MVBR2); colInterval[3]:=f;
  STdError[3]:= skoVBR2/sqrt(ind2); maxim[3]:=max; minim[3]:=min;    setLength(mas,length(MVBR2));
  for i:=0 to ind2-1 do
    mas[i]:= MVBR2[i];   mediana[3]:= median(mas,ind2);   dispersiya[3]:=IntPower(moVBR2,2);
MomentSkewKurtosis(MVBR2,k1,k2,k3,k4,assimetr[3],excess[3]); str(max:1:3,s);  edit34.text:=s;  str(min:1:3,s);
edit35.text:=s;  d:=(max-min)/f; shirInterval[3]:=d;   str(d:1:3,s);  edit36.text:=s;  fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then
    f:=f+1; str(f,s);  edit37.text:=s;  setlength(Q_empir,f);  setlength(Q_teorD,f); setlength(Q_teorDReal,f);
setlength(Q_teorN,f);  m:=min;  Mi:=0;  Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_empir[i]:=0;    Q_teorN[i]:=0;    Q_teorD[i]:=0;    Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind2-1 do begin
      if (MVBR2[j]>=m) and (MVBR2[j]<=m+d) then begin
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1;        Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi;    m:=m+d;    Mi:=0;
  end;
  str(Mmax,s);  edit38.Text:=s;  stringgrid5.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_empir[i],s);    stringgrid5.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox3.Checked then begin
    fmax:=0;    t:=min+d/2;    k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorN[i]:=exp( (t-moVBR2)*(t-moVBR2)/(-2*skoVBR2*skoVBR2) )/(skoVBR2*sqrt(2*Pi)); t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind2*d*Q_teorN[i]);      Q_teorDReal[i]:=ind2*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,3,1,0,max,moVBR2,skoVBR2,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox4.Checked then begin
    fmax:=0;    t:=min+d/2;    k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nChBR2,LVBR2,t,Q_teorN[i]); t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind2*d*Q_teorN[i]);      Q_teorDReal[i]:=ind2*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,3,2,nChBR2,max,0,0,LVBR2);
  end;
  stringgrid6.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_teorD[i],s);    stringgrid6.cells[i,0]:=s;
  end;
```

```
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i];k:=f-3;  str(Xi:1:3,s);  edit45.Text:=s;  str(k,s);
edit46.Text:=s;  i:=1;
  while i<=14 do begin
  if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i]; i:=14;
    end;
    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s);  edit47.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit48.Text:='íå ñóïåðå÷èòü'
  else
    edit48.Text:='ñóïåðå÷èòü';
  Chi_square[3]:= Xi;  df[3]:=k;  ppp[3]:= P;  Razmah[3]:= (maxim[3]-minim[3])/2; SumaM[3]:= SUM(MVBR2);
Chast(Q_empir,Q_teorDReal,3,min,d);
end;

procedure TForm3.ButtonChV2Click(Sender: TObject);
var f,i,j,Mi,k,Mmax:integer;    d,t,m,fmax,Xi,fc,P:real;    min,max,fn:double;    v,h:extended;
    s:string;    mas: DataArray;   k1,k2,k3,k4:extended;
begin
  MeanAndStdDev(MVV2,moVV2,skoVV2);
  if moVV2=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введено вхідні дані! Поверніться, введіть вхідні дані і повторіть спробу.',
mtError, [mbYes], 0) = mrYes then
      exit;
  end;
  str(moVV2:1:3,s);  edit55.Text:=s;  str(skoVV2:1:3,s);  edit56.Text:=s;  v:=100*skoVV2/moVV2; str(v:1:3,s);
edit57.Text:=s;  h:=v/sqrt(ind2);  str(h:1:3,s);  edit58.Text:=s; nCHV2:=trunc(moVV2*moVV2/(skoVV2*skoVV2));
str(nCHV2,s);  edit59.Text:=s; LVV2:=nCHV2/moVV2;  str(LVV2:1:6,s);  edit60.Text:=s;
  if ind2>100 then begin
    fc:=5*log10(ind2);    if fc>trunc(fc) then  f:=trunc(fc)+1
  end else begin
    fc:=1+3.322*log10(ind2);
    if fc>=trunc(fc) then
      f:=trunc(fc)+1
  end;
  str(f,s);  edit49.text:=s;  max:=MaxValue(MVV2);  min:=MinValue(MVV2); colInterval[4]:=f;   STdError[4]:=
skoVV2/sqrt(ind2);   maxim[4]:=max; minim[4]:=min;  setLength(mas,length(MVV2));
  for i:=0 to ind2-1 do
    mas[i]:= MVV2[i];    mediana[4]:= median(mas,ind2);
  dispersiya[4]:=IntPower(moVV2,2);   MomentSkewKurtosis(MVV2,k1,k2,k3,k4,assimetr[4],excess[4]);
  str(max:1:3,s);  edit50.text:=s;  str(min:1:3,s);  edit51.text:=s;  d:=(max-min)/f; shirInterval[4]:=d;   str(d:1:3,s);
edit52.text:=s;  fn:=(max-min)/d;
  if fn>f then
    f:=f+1;
  str(f,s);
  edit53.text:=s;  setlength(Q_empir,f);  setlength(Q_teorD,f);  setlength(Q_teorDReal,f);  setlength(Q_teorN,f);
  m:=min;  Mi:=0;  Mmax:=1;
  for i:=0 to f-1 do begin
    Q_empir[i]:=0;    Q_teorN[i]:=0;    Q_teorD[i]:=0;    Q_teorDReal[i]:=0;
  end;
  for i:=0 to f-1 do begin
    for j:=0 to ind2-1 do begin
      if (MVV2[j]>=m) and (MVV2[j]<=m+d) then begin
        Q_empir[i]:=Q_empir[i]+1;  Mi:=Mi+1;
      end;
    end;
    if Mi>Mmax then
      Mmax:=Mi;  m:=m+d;Mi:=0;
```

```
  end;
  str(Mmax,s);  edit54.Text:=s;  stringgrid7.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_empir[i],s);    stringgrid7.cells[i,0]:=s;
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox7.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorN[i]:=exp((t-moVV2)*(t-moVV2)/(-2*skoVV2*skoVV2) )/(skoVV2*sqrt(2*Pi)); t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];
        k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind2*d*Q_teorN[i]);  Q_teorDReal[i]:=ind2*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,4,1,0,max,moVV2,skoVV2,0);
  end;
  if bsSkinCheckRadioBox8.Checked then begin
    fmax:=0;t:=min+d/2;k:=0;
    for i:=0 to f-1 do begin
      FuncExpon(nCHV2,LVV2,t,Q_teorN[i]);   t:=t+d;
      if Q_teorN[i]>fmax then begin
        fmax:=Q_teorN[i];k:=i
      end;
    end;
    for i:=0 to f-1 do begin
      Q_teorD[i]:=round(ind2*d*Q_teorN[i]); Q_teorDReal[i]:=ind2*d*Q_teorN[i];
    end;
    Raspredeleniye(ZakonR,4,2,nCHV2,max,0,0,LVV2);
  end;
  stringgrid8.Colcount:=f;
  for i:=0 to f-1 do begin
    str(Q_teorD[i],s);    stringgrid8.cells[i,0]:=s;
  end;
  Xi:=0;
  for i:=0 to f-1 do
    Xi:=Xi+IntPower((Q_empir[i]-Q_teorDReal[i]),2)/Q_teorDReal[i];k:=f-3;  str(Xi:1:3,s);  edit61.Text:=s;  str(k,s);
edit62.Text:=s;  i:=1;
  while i<=14 do begin
  if PXI[k,i]>Xi then begin
      P:=PXI[0,i];      i:=14;    end;    i:= Succ(i);
end;
  str(P:1:3,s);  edit63.Text:=s;
  if P>0.05 then
    edit64.Text:='Не суперечить'
  else
    edit64.Text:='Суперечить';
  Chi_square[4]:= Xi;  df[4]:=k;  ppp[4]:= P; Razmah[4]:= (maxim[4]-minim[4])/2;  SumaM[4]:= SUM(MVV2);
Chast(Q_empir,Q_teorDReal,4,min,d);
end;

procedure TForm3.FormActivate(Sender: TObject);
var s:string;
begin
  if MVP = nil then
    SetLength(MVP,1000);  moVP:=Mean(MVP);
  str(moVP:1:3,s);  edit65.Text:=s;
end;

procedure TForm3.bsSkinSpeedButton1Click(Sender: TObject);
var  zakon, gipoteza,i,j,k, p:integer;
```

```
begin
  if moVBR1=0 then begin
      if fMain.bsMessage.MessageDlg('Не введено вхідні дані! Поверніться, введіть вхідні дані і повторіть спробу.',
mtError, [mbYes], 0) = mrYes then
      exit;
  end;
  if dm._a.Active then
    dm._a.Close;
  dm._a.SelectSQL.Clear;
  dm._a.SelectSQL.Add('execute block returns (MO double precision,SKO double precision,variaciya double precision,
colInterval integer, maxim double precision, minim double precision, shirInterval double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('STdError double precision, mediana double precision, dispersiya double precision, assimetr
double precision, excess double precision, Chi_square double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('p double precision, df integer, Razmah double precision, Suma double precision, zakon
integer, gipoteza integer, name var char(50)) as beginend');
  dm._a.CacheOpen;
  if (dm._a.Active) then
    if (dm._a.IsEmpty) then begin
      if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[1]>0.05 then
        gipoteza:= 1
      else
        gipoteza:= 0;
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19],
         [moVBR1,skoVBR1,(skoVBR1/moVBR1),colInterval[1], maxim[1], minim[1],shirInterval[1],
STdError[1],mediana[1],dispersiya[1],assimetr[1],excess[1],Chi_square[1],ppp[1],df[1],Razmah[1],SumaM[1], zakon,
gipoteza, 'Статистика відмов ЧБР1'], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
      if bsSkinCheckRadioBox5.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[2]>0.05 then
        gipoteza:= 1
      else
        gipoteza:= 0;
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19], [moVV1,skoVV1,(skoVV1/moVV1),
colInterval[2], maxim[2], minim[2],shirInterval[2], STdError[2],mediana[2],dispersiya[2],assimetr[2],excess[2],
          Chi_square[2],ppp[2],df[2],Razmah[2],SumaM[2], zakon, gipoteza, 'Статистика відмов ЧВ1'], 2);
      if bsSkinCheckRadioBox3.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[3]>0.05 then
        gipoteza:= 1
      else
        gipoteza:= 0;  //ñóïåðå÷èòü
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19],
[moVBR2,skoVBR2,(skoVBR2/moVBR2),colInterval[3], maxim[3], minim[3],shirInterval[3],
STdError[3],mediana[3],dispersiya[3],assimetr[3],excess[3], Chi_square[3],ppp[3],df[3],Razmah[3],SumaM[3], zakon,
gipoteza,
          'Статистика відмов ЧБР2'], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
      if bsSkinCheckRadioBox7.Checked then
        zakon:= 0
      else
        zakon:= 1;
      if ppp[4]>0.05 then
        gipoteza:= 1
      else
        gipoteza:= 0;
```

```
      dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19], [moVV2,skoVV2,(skoVV2/moVV2),
colInterval[4], maxim[4], minim[4],shirInterval[4], STdError[4],mediana[4],dispersiya[4],assimetr[4],excess[4],
          Chi_square[4],ppp[4],df[4],Razmah[4],SumaM[4], zakon, gipoteza,
          'Чтатистика відмов ЧВ2'], 2);
    end;
  if dm._b.Active then
    dm._b.Close;
  dm._b.SelectSQL.Clear;
  dm._b.SelectSQL.Add('execute block returns (p1 var char(50),e1 integer,Ne2 integer, pre double precision, Npre
double precision, t1 double precision, Nt1 double precision,');
  dm._b.SelectSQL.Add('prT double precision, NprT double precision, raznica double precision, groups integer,centr
double precision) as beginend');
  dm._b.CacheOpen;
  if dm._c.Active then
    dm._c.Close;
  dm._c.SelectSQL.Clear;
  dm._c.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._c.CacheOpen;
  if dm._d.Active then
    dm._d.Close;
  dm._d.SelectSQL.Clear;
  dm._d.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._d.CacheOpen;
  if dm._i.Active then
    dm._i.Close;
  dm._i.SelectSQL.Clear;
  dm._i.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._i.CacheOpen;
  if dm._f.Active then
    dm._f.Close;
  dm._f.SelectSQL.Clear;
  dm._f.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision, groups integer) as beginend');
  dm._f.CacheOpen;

  if Chastots[4,1].p1<>'' then
    p:=4
  else begin
    if Chastots[3,1].p1<>'' then
      p:=3
    else begin
      if Chastots[2,1].p1<>'' then
        p:=2
      else
        p:=1;
    end;
  end;
  if (dm._b.Active) then
    if (dm._b.IsEmpty) then begin
      for i:=1 to p do begin
        k:=0;
        for ch2:=1 to 20 do begin
          inc(k);
          if Chastots[i,ch2].p1='' then
            break
          else
            continue;
        end;
        for j:=1 to k-1 do begin
          dm._b.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12],
            [Chastots[i,j].p1,Chastots[i,j].e1,Chastots[i,j].Ne2,Chastots[i,j].pre,Chastots[i,j].Npre,
             Chastots[i,j].t1,Chastots[i,j].Nt1, Chastots[i,j].prT, Chastots[i,j].NprT,
             Chastots[i,j].raznica,i,Chastots[i,j].centr], 2);
```

```
      end;
     end;
    end;
     for i:=1 to 30 do begin
      dm._c.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[1,i].x, ZakonR[1,i].y, 1],2);
      dm._d.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[2,i].x, ZakonR[2,i].y, 2],2);
      dm._i.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[3,i].x, ZakonR[3,i].y, 3],2);
      dm._f.CacheModify([0,1,2],[ZakonR[4,i].x, ZakonR[4,i].y, 4],2);
     end;
    GenerateReport('statistik_2komp.fr3');
    dm.frxReport1.ShowReport;
end;

end.
```

Модуль основних функцій

```
unit OnlyCode;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  Word97, OleServer, StdCtrls,  ExtCtrls,
ComObj, DdeMan, Clipbrd,  WordXP, ExcelXP, Grids, Excel2000, Word2000, DB, math, DBGridEh, DBGrids,
pFIBDataSet, var iants,_DM, DateUtils;

type
  TFunction = function(x: double): double;
type
  DataItem = double;
  DataArray = array of DataItem;

type
    TDataZakon = record
    x: real;
    y: real;
end;
type  DataZakon = array [1..4,1..30] of TDataZakon;

type Tchastot = record
  p1: String;  e1: integer;  Ne2: integer;  pre: real;  Npre: real;  t1:real;
  Nt1:real;  prT: real;  NprT: real;  raznica : real;  centr :real;
end;
  procedure CreateZAYAV(const NameF: string; aForm: TFormClass; id_zay:integer);
  procedure WriteText(ACanvas: TCanvas; ARect: TRect; DX, DY: Integer;
                  const Text: string; Alignment: TAlignment);
  function WindowsExtTextOut(DC: HDC; X, Y: Integer; Options: Longint;
            var  Rect: TRect; Str: String; Count: Longint{; Dx: PInteger}): BOOL;
  procedure CreateSTAT(const NameF: string; aForm: TForm);
  procedure GenerateReport(name: string);
  function Factorial(x:integer):Extended;
  procedure FuncStepen(K:integer;L,x:real;var F:real);
  procedure FuncExpon(K:integer;L,x:real;var F:real);
  procedure hook(K:integer;L,x:real;var F:Extended);
  procedure hookD(K:integer;L,x:real;var HD:Extended);
  procedure condition(H,VP:real;var Integ:real);
  procedure Hiper(K:integer;L,a,b:real;var Integ:real);
  procedure Hiper1(K,K1:integer;L,B1,a,b:real;var Integ:Extended);
  procedure Hiper2(K,K1:integer;L,B1,b:real;var Integ:Extended);
  procedure Hiper3(K,K1:integer;L,B1,a,b,c:real;var Integ:Extended);
  procedure Hiper4(K,K1:integer;L,B1,a,b:real;var Integ:Extended);
  procedure KoefG(K:integer;L,c,I,VV,VP:real;var Koef:real);
  procedure PribZatr(c1,c2,c3:real;K:integer;L,c,I,VV,VP:real;var Koef1,Koef2:real);
```

```
  procedure KoefG1(c,VP:real;I:Extended;var Koef:real);
  procedure PribZatr1(c1,c2,c3,T,VP:real;I:Extended;var Pr,Za:real);
  procedure KoefG3(c,VP,I:real;I1,I2:Extended;var Koef:real);
  procedure PribZatr3(c1,c2,c3,T,I:real;I1:Extended;var Pr,Za:real);
  procedure KoefG4(c,VP:real;I1,I2:Extended;var Koef:real);
  procedure PribZatr4(c1,c2,c3,c4,T,VP:real;I1,I2:Extended; var  Pr,Za:real);
  procedure KoefG5(c,VP:real;I1,I2,I3:Extended;var Koef:real);
  procedure PribZatr5(c1,c2,c3,c4,T,VP:real;I1,I2,I3:Extended; var  Pr,Za:real);
  function median(data: DataArray; num: integer): real;
  function FindMode(data: DataArray; num: integer): real;
  function Simpson(Fun: TFunction; a,b,eps: double): double;
  function Fun(t: double): double;
  function funLaplas(x: double): double;
  procedure BiDirBubbleSort(var data: array of double);
  procedure SelectionSort(var data: array of double);
  procedure QuickSort(var data: DataArray);
  procedure ShellSort(var data: array of double);
  procedure Chast(Q_emp :array of integer; Q_teo:array of real; n:integer; min_, shir: real);
  procedure Raspredeleniye (var data:DataZakon; n, tip, K:integer; xMax,MO,SKO,L:real);

var ind,ind1,ind2,indP,nChBR,nCHV,nChBR1,nChV1,nChBR2,nChV2,    m,q,mh,m1,q1,m2,q2:integer;
    st,Dist,Dist1,    VBR,VV,VP,L,B,H,cb,cv,cp,    VBR1,VV1,L1,B1,cb1,cv1,    VBR2,VV2,L2,B2,cb2,cv2:real;
    moVP,moVBR,skoVBR,LVBR,moVV,skoVV,LVV, moVP1,moVBR1,skoVBR1,LVBR1,moVV1,skoVV1,LVV1,
    moVP2,moVBR2,skoVBR2,LVBR2,moVV2,skoVV2,LVV2:extended;
    STdError,mediana,dispersiya, assimetr, excess,Razmah,    maxim, minim, Suma,shirInterval,Chi_square, ppp,
df, SumaM: array [1..4] of extended; colInterval: array [1..4] of integer;
    MVBR,MVV,MVP, MVBR1,MVV1, MVBR2,MVV2:array of Double;
    Chastots: array [1..4, 1..20] of Tchastot;  ZakonR: DataZakon;  maximum:integer;
    KG,Prib,Zatr:array [1..100000] of real; PXI:array [0..9,1..14] of real;
    Q_empir,Q_teorD:array of integer; Q_teorDReal:array of real; Q_teorN:array of real;

implementation

uses ZAYAV, main, Statistic;

procedure Raspredeleniye (var data:DataZakon; n, tip, K:integer; xMax,MO,SKO,L:real);
var
  i:integer; x, shag:real;
begin
  if tip = 1 then begin
    shag:= xMax/30;
    x:=shag;
    for i:=1 to 30 do begin
      data[n,i].y:=exp( (x-MO)*(x-MO)/(-2*SKO*SKO) )/(SKO*sqrt(2*Pi));  data[n,i].x:=x; x:=x+shag;
    end;
  end else begin
    shag:= xMax/30;    x:=shag;
    for i:=1 to 30 do begin
      data[n,i].y:=IntPower(L,K)*IntPower(x,K-1)*exp(-L*x)/Factorial(K-1); data[n,i].x:=x;  x:=x+shag;
    end;
  end;
end;

procedure Chast(Q_emp :array of integer; Q_teo:array of real; n:integer; min_, shir: real);
var
  i, col,sumE :integer; d,sumT :real;
begin
  d:=min_;
  col:= length(Q_emp);
  sumT:= 0; sumE:=0;
  for i:=0 to col-1 do begin
    sumT:= sumT + Q_teo[i];
```

```
    sumE:= sumE + Q_emp[i];
  end;
  for i:=0 to col-1 do begin
    Chastots[n,i+1].p1:=FormatFloat('#.###', d)+'-'+ FormatFloat('#.###', d+shir);
    Chastots[n,i+1].centr:= d+shir/2;
    d:=d+shir; Chastots[n,i+1].e1:=Q_emp[i];  Chastots[n,i+1].t1:=Q_teo[i];
    Chastots[n,i+1].raznica:=Q_emp[i]-Q_teo[i];
    if i=0 then begin
      Chastots[n,i+1].Ne2:=Q_emp[i]; Chastots[n,i+1].Nt1:=Q_teo[i];
    end else begin
      Chastots[n,i+1].Ne2:=Chastots[n,i].Ne2+Q_emp[i]; Chastots[n,i+1].Nt1:=Chastots[n,i].Nt1+Q_teo[i];
    end;
    Chastots[n,i+1].pre:= (Chastots[n,i+1].e1/sumE)*100; Chastots[n,i+1].prT:= (Chastots[n,i+1].t1/sumT)*100;
    if i=0 then begin
      Chastots[n,i+1].Npre:=Chastots[n,i+1].pre; Chastots[n,i+1].NprT:=Chastots[n,i+1].prT;
    end else begin
      Chastots[n,i+1].Npre:=Chastots[n,i+1].pre+Chastots[n,i].Npre;
Chastots[n,i+1].NprT:=Chastots[n,i+1].prT+Chastots[n,i].NprT;
    end;
  end;
end;

procedure BiDirBubbleSort(var data: array of double);
var
  j, limit, st: Integer;  t: double; Swapped: Boolean;
begin
  limit := High(data) + 1; st := -1;
  while (st < limit)
  do begin
     Inc(st); Dec(limit); Swapped := False; j := st;
     while (j < limit)
     do begin
        if (data[j] > data[j+1])
        then begin
            t := data[j]; data[j] := data[j+1]; data[j+1] := t; Swapped := True;
            end;
        Inc(j);
        end;
     if (not Swapped)
     then EXIT
     elseSwapped := False;
     j := limit - 1;
     repeat
       if (data[j] > data[j+1])
       then begin
           t := data[j]; data[j] := data[j+1]; data[j+1] := t; Swapped := True;
           end;
       Dec(j);
     until (j < st);
     if (not Swapped) then EXIT;
     end;
end;

procedure SelectionSort(var data: array of double);
var
  lo, hi, i, j: Integer;
  t: double;
begin
  lo := Low(data); hi := High(data);
  for i := lo to hi do
    for j := hi downto i + 1 do
      if data[i] > data[j] then
```

```
      begin
        t := data[i]; data[i] := data[j]; data[j] := t;
      end;
end;

procedure QuickSort(var data: DataArray);
  procedure QSort(var b: DataArray; iLo, iHi: Integer);
  var
    Lo, Hi: Integer; Mid, t: double;
  begin
    Lo := iLo; Hi := iHi; Mid := b[(Lo + Hi) div 2];
    repeat
      while b[Lo] < Mid do Inc(Lo);
      while b[Hi] > Mid do Dec(Hi);
      if Lo <= Hi then
      begin
        t := b[Lo]; b[Lo] := b[Hi]; b[Hi] := t; Inc(Lo); Dec(Hi);
      end;
    until Lo > Hi;
    if Hi > iLo then QSort(b, iLo, Hi); if Lo < iHi then QSort(b, Lo, iHi);
  end;
begin
  QSort(data, Low(data), High(data));
end;

procedure ShellSort(var data: array of double);
var
  lo, hi, i, j, incr: Integer; t: double;
begin
  lo := Low(data); hi := High(data); incr := hi div 2;
  while (incr > lo) do begin
     i := incr;
     while (i <= hi)
     do begin
        j := i - incr;
        while (j > lo - 1)
        do if (data[j] > data[j+incr])
           then begin
                t := data[j]; data[j] := data[j+incr]; data[j+incr] := t; j := j - incr;
                end
           else j := lo - 1;
        Inc(i);
        end;
     incr := incr div 2;
     end;
end;

function FindMode(data: DataArray; num: integer): real;
var
  t, w, count, oldcount: integer; md, oldmd: real;
begin
    oldmd := 0; oldcount := 0;
    for t := 1 to num do
    begin
      md := data[t]; count := 1;
      for w := t+1 to num do
      if md=data[w] then count := count+1;
      if count>oldcount then
      begin
        oldmd := md; oldcount := count;
      end;
    end;
```

```
    Result := oldmd;
end;

function median(data: DataArray; num: integer): real;
var
  dtemp: DataArray; t: integer;

begin
  setLength(dtemp,length(data));
  for t:=0 to num-1 do
    dtemp[t]:=data[t]; QuickSort(dtemp);
  if num mod 2=0 then begin
    Result:= (dtemp[num div 2]+dtemp[(num div 2)-1])/2;
  end else begin
    Result:= dtemp[num div 2];
  end;
end;

function Simpson(Fun: TFunction; a,b,eps: double): double;
var
  i,n: integer;  h,s0,s: double;
begin
  n:=1; s:=0;
  repeat
    n:=n*2; h:=(b-a)/n; s0:=s; s:=Fun(a)+Fun(b);
    for i:=1 to n-1 do
      s:=s+2*(1+i mod 2)*Fun(a+i*h);  s:=s*(b-a)/(3*n); until abs(s-s0) <= eps; result:=s;
end; //Simpson

function Fun(t: double): double;
begin
  result:=exp(-t*t/2);
end; //Fun

function funLaplas(x: double): double;
begin
  result:=Simpson(Fun,0,x,1E-12)/sqrt(2*pi);
end; //F

function Factorial(x:integer):Extended;
var s:Extended;
    i:integer;
begin
  s:=1;
  for i:=1 to x do
    s:=s*i;
  Result:=s;
end;

procedure FuncStepen(K:integer;L,x:real;var F:real);
var s:real;
    i:integer;
begin
  s:=0;
  for i:=0 to K-1 do s:=s+IntPower((L*x),i)/Factorial(i);  F:=1-exp(-L*x)*s;
end;

procedure FuncExpon(K:integer;L,x:real;var F:real);
begin
  F:=IntPower(L,K)*IntPower(x,K-1)*exp(-L*x)/Factorial(K-1);
end;
```

```
procedure hook(K:integer;L,x:real;var F:Extended);
var s:Extended; j,i:integer;
begin
  case  K of
  0,1:F:=L*x; 2:F:=(L*x-0.5+0.5*exp(-2*L*x))/2;  3:F:=(L*x-1+2*exp(-1.5*L*x)*sin(Pi/3+sqrt(3)*L*x/2)/sqrt(3))/3;
    4:F:=(L*x-2/3+0.5*exp(-2*L*x)+sqrt(2)*exp(-L*x)*sin(Pi/4+L*x))/4;
  else begins:=0;
            for i:=1 to 5 do for j:=K*i to 30 do
            s:=s+IntPower((L*x),j)/Factorial(j); F:=exp(-L*x)*s;
       end;
  end;
end;

procedure hookD(K:integer;L,x:real;var HD:Extended);
var f,f1:extended;
begin
  hook(K,L,x+0.0001,f); hook(K,L,x,f1); HD:=(f-f1)/0.0001;
end;

procedure condition(H,VP:real;var Integ:real);
begin
  if VP>H then Integ:=VP elseInteg:=H;
end;

procedure Hiper(K:integer;L,a,b:real;var Integ:real);
var s,h,x,F:real; i:integer;
begin
  s:=0; h:=(b-a)/100; x:=a+h/2;
  for i:=1 to 100 do
  begin
    FuncStepen(K,L,x,F); s:=s+(1-F); x:=x+h
  end;
  Integ:=h*s;
end;

procedure Hiper1(K,K1:integer;L,B1,a,b:real; var  Integ:Extended);
var h,x,F:real;  s,F1:Extended; i:integer;
begin
  s:=0; h:=(b-a)/100; x:=a+h/2;
  for i:=1 to 100 do
  begin
    FuncStepen(K1,B1,x,F); hook(K,L,b-x,F1); s:=s+(1-F)*F1; x:=x+h
  end;
  Integ:=h*s;
end;

procedure Hiper2(K,K1:integer;L,B1,b:real;var Integ:Extended);
var h,x:real; s,F,F1:Extended; i:integer;
begin
  s:=0; h:=b/100; x:=h/2;
  for i:=1 to 100 do begin
    hookD(K,L,x,F); hookD(K1,B1,x,F1); s:=s+F*F1; x:=x+h
  end;
  Integ:=h*s;
end;

procedure Hiper3(K,K1:integer;L,B1,a,b,c:real;var Integ:Extended);
var h,x,F:real; s,F1:Extended; i:integer;
begin
  s:=0; h:=(b-a)/100; x:=a+h/2;
  for i:=1 to 100 do begin
    FuncStepen(K1,B1,x,F); hook(K,L,c-x,F1); s:=s+(1-F)*F1; x:=x+h
```

```
  end;
  Integ:=h*s;
end;

procedure Hiper4(K,K1:integer;L,B1,a,b:real;var Integ:Extended);
var h,x,F:real; s,F1:Extended; i:integer;
begin
  s:=0; h:=(b-a)/100; x:=a+h/2;
  for i:=1 to 100 do begin
    FuncStepen(K1,B1,x,F); hook(K,L,b-x,F1); s:=s+(1-F)*F1; x:=x+h
  end;
  Integ:=h*s;
end;

procedure KoefG(K:integer;L,c,I,VV,VP:real;var Koef:real);
var F:real;
begin
  FuncStepen(K,L,c,F); Koef:=I/(I+VV*F+VP*(1-F));
end;

procedure PribZatr(c1,c2,c3:real;K:integer;L,c,I,VV,VP:real;var Koef1,Koef2:real);
var F:real;
begin
  FuncStepen(K,L,c,F); Koef1:=(c1*I-c2*VV*F-c3*VP*(1-F))/(I+VV*F+VP*(1-F));
  Koef2:=(c2*VV*F+c3*VP*(1-F))/I;
end;

procedure KoefG1(c,VP:real;I:Extended;var Koef:real);
begin
  Koef:=c/(c+VP+I);
end;

procedure PribZatr1(c1,c2,c3,T,VP:real;I:Extended;var Pr,Za:real);
begin
  Pr:=(c1*T-c2*I-c3*VP)/(T+VP+I); Za:=(c2*I+c3*VP)/T;
end;

procedure KoefG3(c,VP,I:real;I1,I2:Extended;var Koef:real);
begin
  Koef:=(c+I+I1)/(c+VP+I1+I2);
end;

procedure PribZatr3(c1,c2,c3,T,I:real;I1:Extended;var Pr,Za:real);
begin
  Pr:=(c1*T+(c1-c2)*I1+(c1-c3)*I)/(T+I+I1); Za:=((c2-c1)*I1+(c3-c1)*I)/(T+I+I1);
end;

procedure KoefG4(c,VP:real;I1,I2:Extended;var Koef:real);
begin
  Koef:=c/(c+VP+I1+I2);
end;

procedure PribZatr4(c1,c2,c3,c4,T,VP:real;I1,I2:Extended; var  Pr,Za:real);
begin
  Pr:=(c1*T-c2*I1-c3*I2-c4*VP)/(T+VP+I1+I2); Za:=(c2*I1+c3*I2+c4*VP)/T;
end;

procedure KoefG5(c,VP:real;I1,I2,I3:Extended;var Koef:real);
begin
  Koef:=(c+I1+I2)/(c+VP+I1+I2+I3);
end;
```

```
procedure PribZatr5(c1,c2,c3,c4,T,VP:real;I1,I2,I3:Extended; var  Pr,Za:real);
begin
  Pr:=(c1*T+(c1-c2)*I1+(c1-c3)*I2-c4*VP)/(T+VP+I1+I2); Za:=((c2-c1)*I1+(c1-c3)*I2+c4*VP)/(T+I1+I2);
end;

procedure CreateSTAT(const NameF: string; aForm: TForm);
var
  Child: TfStatistic;  i :integer;
begin
  with  fMain do
  for I := MDIChildCount-1 downto 0 do begin
    if MDIChildren[I].Name= 'fStatistic' then begin
      SetForegroundWindow(MDIChildren[I].Handle);
      exit;
    end;
  end;
  Child := TfStatistic.Create(fMain);
  with  Child do begin
    Caption := NameF; WindowState:=wsMaximized;
  end;
end;

procedure CreateZAYAV(const NameF: string; aForm: TFormClass; id_zay:integer);
var
  Child: TfZAYAV; i :integer;
begin
 with  fMain do
  for I := MDIChildCount-1 downto 0 do begin
    if MDIChildren[I].Name= 'fZAYAV' then begin
      if MDIChildren[I] is TfZAYAV then begin
        Child:= (MDIChildren[I] as TfZAYAV);
        if Assigned(Child) then begin
          with  Child do begin
          end;
        end;
      end;
      SetForegroundWindow(MDIChildren[I].Handle);
      exit;
    end;
  end;
  Child := TfZAYAV.Create(fMain);
  Child.WindowState:=wsNormal;
  with  Child do begin
    Caption := NameF; WindowState:=wsMaximized;
    if (id_zay<>CurrZayavka) and (id_zay<>0) then
      CurrZayavka:= id_zay;
  end;
end;

procedure WriteText(ACanvas: TCanvas; ARect: TRect; DX, DY: Integer;
  const Text: string; Alignment: TAlignment);
const
  AlignFlags: array[TAlignment] of Integer =
  (DT_LEFT or DT_WORDBREAK or DT_EXPANDTABS or DT_NOPREFIX,
    DT_RIGHT or DT_WORDBREAK or DT_EXPANDTABS or DT_NOPREFIX,
    DT_CENTER or DT_WORDBREAK or DT_EXPANDTABS or DT_NOPREFIX);
var
  Left: Integer;  I: TColorRef;
begin
  I := ColorToRGB(ACanvas.Brush.Color);
  if GetNearestColor(ACanvas.Handle, I) = I then
  begin{ Use ExtTextOut for solid colors }
```

```
    case  Alignment of
      taLeftJustify:
        Left := ARect.Left + DX;
      taRightJustify:
        Left := ARect.Right - ACanvas.TextWidth(Text) - 3;
    else{ taCenter }
      Left := ARect.Left + (ARect.Right - ARect.Left) shr 1
        - (ACanvas.TextWidth(Text) shr 1);
    end;
    WindowsExtTextOut(ACanvas.Handle, Left, ARect.Top + DY, ETO_OPAQUE or
      ETO_CLIPPED, ARect, Text, Length(Text));
  end;
end;

function WindowsExtTextOut(DC: HDC; X, Y: Integer; Options: Longint;
  var  Rect: TRect; Str: String; Count: Longint{; Dx: PInteger}): BOOL;
begin
  Result := ExtTextOut(DC, X, Y, Options,  @Rect, PChar(Str), Count, nil);
end;

procedure GenerateReport(name: string);
begin
  DM.frxReport1.LoadFromFile(ExtractFileDir(Application.ExeName)+'\Reports\'+name);
end;

end.
```

Модуль статистики

```
unit Statistic;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, bsMessages,
BusinessSkinForm, bsSkinCtrls, bsSkinBoxCtrls, OnlyCode, strUtils,  ExtCtrls, StdCtrls, Mask;

type
  TfStatistic = class(TForm)
    bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
    bsMessage: TbsSkinMessage;
    bsSkinGroupBox1: TbsSkinGroupBox;
    bsSkinSplitter1: TbsSkinSplitter;
    bsSkinGroupBox2: TbsSkinGroupBox;
    RadioButton4: TbsSkinCheckRadioBox;
    RadioButton3: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinGroupBox3: TbsSkinGroupBox;
    bsSkinCheckRadioBox1: TbsSkinCheckRadioBox;
    bsSkinCheckRadioBox2: TbsSkinCheckRadioBox;
    Edit31: TbsSkinTrackEdit;
    Edit32: TbsSkinTrackEdit;
    Edit23: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel5: TbsSkinStdLabel;
    Edit37: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel6: TbsSkinStdLabel;
    Edit24: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel1: TbsSkinStdLabel;
    Edit38: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel2: TbsSkinStdLabel;
    Edit25: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel3: TbsSkinStdLabel;
    Edit39: TbsSkinEdit;
    bsSkinStdLabel4: TbsSkinStdLabel;
```

bsSkinLabel1: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel2: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel3: TbsSkinLabel;
bsSkinGroupBox4: TbsSkinGroupBox;
Edit55: TbsSkinEdit;
Edit56: TbsSkinEdit;
bsSkinGroupBox5: TbsSkinGroupBox;
RadioButton8: TbsSkinCheckRadioBox;
RadioButton9: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinLabel4: TbsSkinLabel;
RadioButton10: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinLabel5: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel6: TbsSkinLabel;
Edit26: TbsSkinEdit;
Edit27: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel7: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel8: TbsSkinStdLabel;
Edit40: TbsSkinEdit;
Edit41: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel9: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel10: TbsSkinStdLabel;
bsSkinGroupBox6: TbsSkinGroupBox;
Edit58: TbsSkinEdit;
Edit59: TbsSkinEdit;
bsSkinLabel7: TbsSkinLabel;
bsSkinLabel8: TbsSkinLabel;
Edit28: TbsSkinEdit;
Edit29: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel11: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel12: TbsSkinStdLabel;
Edit42: TbsSkinEdit;
Edit43: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel13: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel14: TbsSkinStdLabel;
bsSkinGroupBox7: TbsSkinGroupBox;
bsSkinCheckRadioBox8: TbsSkinCheckRadioBox;
bsSkinCheckRadioBox9: TbsSkinCheckRadioBox;
Edit33: TbsSkinTrackEdit;
Edit34: TbsSkinTrackEdit;
Edit60: TbsSkinEdit;
Edit61: TbsSkinEdit;
Edit35: TbsSkinTrackEdit;
Edit36: TbsSkinTrackEdit;
bsSkinGroupBox8: TbsSkinGroupBox;
bsSkinStdLabel15: TbsSkinStdLabel;
Edit30: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel16: TbsSkinStdLabel;
Edit44: TbsSkinEdit;
bsSkinStdLabel17: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel18: TbsSkinStdLabel;
Edit54: TbsSkinEdit;
bsSolved: TbsSkinButton;
bsSkinStdLabel19: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel20: TbsSkinStdLabel;
bsSkinGroupBox9: TbsSkinGroupBox;
bsSkinStdLabel21: TbsSkinStdLabel;
bsSkinStdLabel22: TbsSkinStdLabel;
Edit49: TbsSkinEdit;
Edit48: TbsSkinEdit;
bsSkinButton2: TbsSkinButton;
bsSkinGroupBox10: TbsSkinGroupBox;
bsSkinStdLabel23: TbsSkinStdLabel;

```
  bsSkinStdLabel24: TbsSkinStdLabel;
  Edit46: TbsSkinEdit;
  Edit45: TbsSkinEdit;
  bsSkinButton3: TbsSkinButton;
  bsSkinGroupBox11: TbsSkinGroupBox;
  bsSkinStdLabel25: TbsSkinStdLabel;
  bsSkinStdLabel26: TbsSkinStdLabel;
  Edit52: TbsSkinEdit;
  Edit47: TbsSkinEdit;
  bsSkinButton4: TbsSkinButton;
  bsSkinGroupBox12: TbsSkinGroupBox;
  RadioButton5: TbsSkinCheckRadioBox;
  RadioButton6: TbsSkinCheckRadioBox;
  RadioButton7: TbsSkinCheckRadioBox;
  bsSkinMaskEdit1: TbsSkinMaskEdit;
  bsSkinMaskEdit2: TbsSkinMaskEdit;
  bsZvit: TbsSkinSpeedButton;
  procedure FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
  procedure bsSolvedClick(Sender: TObject);
  procedure inicial; //N6Click
  procedure inicial1;
  procedure Edit23KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit37KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit55KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit24KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit38KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit56KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit25KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit39KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit26KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit40KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit27KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit41KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit58KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit59KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit28KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit42KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit60KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit29KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit43KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit61KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit30KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit44KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure Edit54KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
  procedure bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton5Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton3Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton4Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton6Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton7Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton8Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton9Click(Sender: TObject);
  procedure RadioButton10Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton3Click(Sender: TObject);
  procedure bsSkinButton4Click(Sender: TObject);
  procedure FormActivate(Sender: TObject);
  procedure bsZvitClick(Sender: TObject); //N5Click

private
  { Private declarations }

public
```

```
    { Public declarations }

  end;

var
  fStatistic: TfStatistic;

implementation

uses _DM, main, GR_ser_prib, GR_ser_zatr, GR_KG;

{$R *.dfm}

procedure TfStatistic.FormClose(Sender: TObject; var  Action: TCloseAction);
begin
  Action := caFree;
end;

procedure TfStatistic.bsSolvedClick(Sender: TObject);
var i:integer; S,S1:string; G,T,Integ,KGmax,Topt,KGN, Cmin,ToptC,ZatrN, Smax,ToptS,PribN:real;
Integ1,Integ2,Integ3:Extended;
begin
  for i:=1 to 100000 do begin
    KG[i]:=0; Prib[i]:=0; Zatr[i]:=0;
  end;
  bsSkinMaskEdit1.Text:= TimeToStr(Time);
  if (RadioButton5.Checked) and (RadioButton3.Checked) then begin
    if VBR=0 then begin
      if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
            mrYes then
      exit;
    end;
    L:=m/VBR; Dist:=3*VBR; T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100; Smax:=0; Topt:=0; ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
    repeat
      Hiper(m,L,0,T,Integ); KoefG(m,L,T,Integ,VV,VP,KGN); PribZatr(cb,cv,cp,m,L,T,Integ,VV,VP,PribN,ZatrN);
      KG[i]:=KGN; Prib[i]:=PribN; Zatr[i]:=ZatrN;
      if KGN>KGmax then begin
        KGmax:=KGN; Topt:=T
      end;
      if PribN>Smax then begin
        Smax:=PribN; ToptS:=T
      end;
      if ZatrN<Cmin then begin
        Cmin:=ZatrN; ToptC:=T
      end;
      i:=i+1; T:=T+0.01;
      Application.ProcessMessages;
    until T>Dist;
    maximum:=i;
  end;

  if (RadioButton6.Checked) and (RadioButton3.Checked) then begin
    if VBR=0 then begin
      if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
            mrYes then
      exit;
    end;
    L:=m/VBR; B:=q/VV; Dist:=3*VBR; T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100;
    Smax:=0; Topt:=0; ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
    repeat
      Hiper1(m,q,L,B,0,T,Integ1); KoefG1(T,VP,Integ1,KGN); PribZatr1(cb,cv,cp,T,VP,Integ1,PribN,ZatrN);
      KG[i]:=KGN; Prib[i]:=PribN; Zatr[i]:=ZatrN;
```

```
    if KGN>KGmax then begin
      KGmax:=KGN; Topt:=T
    end;
    if PribN>Smax then begin
      Smax:=PribN; ToptS:=T
    end;
    if ZatrN<Cmin then begin
      Cmin:=ZatrN; ToptC:=T
    end;
    inc(i); T:=T+0.01; Application.ProcessMessages;
  until T>Dist;
  maximum:=i;
end;

if (RadioButton7.Checked) and (RadioButton3.Checked) then begin
  if VBR=0 then begin
    if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
          mrYes then
    exit;
  end;
  L:=m/VBR; B:=q/VV; Dist:=3*VBR; FuncStepen(m,B,H,G); T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100; Smax:=0;
  Topt:=0; ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
  repeat
    condition(H,VP,Integ); Hiper3(m,q,L,B,0,H,T,Integ1); Hiper4(m,q,L,B,H,T,Integ2);
    KoefG3(T,VP,Integ,Integ1,Integ2/(1-G),KGN); PribZatr3(cb,cv,cp,T,Integ,Integ1,PribN,ZatrN);
    KG[i]:=KGN; Prib[i]:=PribN; Zatr[i]:=ZatrN;
    if KGN>KGmax then begin
      KGmax:=KGN; Topt:=T
    end;
    if PribN>Smax then begin
      Smax:=PribN;  ToptS:=T
    end;
    if ZatrN<Cmin then begin
      Cmin:=ZatrN; ToptC:=T
    end;
    inc(i); T:=T+0.01; Application.ProcessMessages;
  until T>Dist;
  maximum:=i;
end;

if (RadioButton8.Checked) and (RadioButton4.Checked) then begin
  if VBR1=0 then begin
    if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
          mrYes then
    exit;
  end;
  L1:=m1/VBR1; B1:=q1/VV1; L2:=m2/VBR2; B2:=q2/VV2;
  if VBR1>VBR2 then
    Dist:=3*VBR1
  else
    Dist:=3*VBR2;  T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100; Smax:=0; Topt:=0;  ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
  repeat
    Hiper1(m1,q1,L1,B1,0,T,Integ1); Hiper1(m2,q2,L2,B2,0,T,Integ2); KoefG4(T,VP,Integ1,Integ2,KGN);
    PribZatr4(cb1,cv1,cv2,cp,T,VP,Integ1,Integ2,PribN,ZatrN); KG[i]:=KGN; Prib[i]:=PribN;
    Zatr[i]:=ZatrN;
   if KGN>KGmax then begin
      KGmax:=KGN; Topt:=T
    end;
    if PribN>Smax then begin
      Smax:=PribN; ToptS:=T
    end;
    if ZatrN<Cmin then begin
```

```
      Cmin:=ZatrN;  ToptC:=T
    end;
    inc(i); T:=T+0.01; Application.ProcessMessages; until T>Dist; maximum:=i;
end;

if (RadioButton9.Checked) and (RadioButton4.Checked) then begin
  if VBR1=0 then begin
    if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
          mrYes then
    exit;
  end;
  L1:=m1/VBR1; B1:=q1/VV1; L2:=m2/VBR2; B2:=q2/VV2;
  if VBR1>VBR2 then
    Dist:=3*VBR1
  else
    Dist:=3*VBR2; T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100; Smax:=0; Topt:=0; ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
  repeat
    hook(m1,L1,T,Integ1);  hook(m2,L2,T,Integ2); KoefG4(T,VP,VV1*Integ1,VV2*Integ2,KGN);
    PribZatr4(cb1,cv1,cv2,cp,T,VP,VV1*Integ1,VV2*Integ2,PribN,ZatrN); KG[i]:=KGN;
    Prib[i]:=PribN; Zatr[i]:=ZatrN;
    if KGN>KGmax then begin
      KGmax:=KGN; Topt:=T
    end;
    if PribN>Smax then begin
      Smax:=PribN; ToptS:=T
    end;
    if ZatrN<Cmin then begin
      Cmin:=ZatrN; ToptC:=T
    end;
    inc(i); T:=T+0.01;  Application.ProcessMessages;
  until T>Dist; maximum:=i;
end;

if (RadioButton10.Checked) and (RadioButton4.Checked) then begin
  if VBR1=0 then begin
    if bsMessage.MessageDlg('Не введені вхідні дані! Введіть дані і спробуйте ще. ', mtError, [mbYes], 0) =
          mrYes then
    exit;
  end;
  L1:=m1/VBR1; B1:=q1/VV1; L2:=m2/VBR2; B2:=q2/VV2;
  if VBR1>VBR2 then
    Dist:=3*VBR1
  else
    Dist:=3*VBR2;
  T:=0.01; KGmax:=0; Cmin:=100; Smax:=0; Topt:=0; ToptS:=0; ToptC:=0; i:=1;
  repeat
    hook(m1,L1,T,Integ1); hook(m2,L2,T,Integ2); Hiper2(q1,q2,B1,B2,T,Integ3);
    KoefG5(T,VP,VV1*Integ1,VV2*Integ2,Integ3,KGN);
    PribZatr5(cb1,cv1,cv2,cp,T,VP,VV1*Integ1,VV2*Integ2,Integ3,PribN,ZatrN); KG[i]:=KGN;
    Prib[i]:=PribN; Zatr[i]:=ZatrN;
    if KGN>KGmax then begin
      KGmax:=KGN; Topt:=T
    end;
    if PribN>Smax then begin
      Smax:=PribN; ToptS:=T
    end;
    if ZatrN<Cmin then begin
      Cmin:=ZatrN; ToptC:=T
    end;
    inc(i); T:=T+0.01; Application.ProcessMessages;
  until T>Dist;
  maximum:=i;
```

```
  end;
  S:= inttostr(trunc(Topt)); S:= S + ' год '; Str(trunc((Topt-trunc(Topt))*60),S1);
  S:= S + S1 + ' хв.'; Edit48.Text:=S; Str(KGmax:1:3,S); Edit49.Text:=S;
  S:= inttostr(trunc(ToptS)); S:= S + 'год '; Str(trunc((ToptS-trunc(ToptS))*60),S1);
  S:= S + S1 + ' хв.'; Edit45.Text:=S; Str(Smax:1:3,S); Edit46.Text:=S;
  S:= inttostr(trunc(ToptC)); S:= S + ' год. '; Str(trunc((ToptC-trunc(ToptC))*60),S1);
  S:= S + S1 + ' хв.';  Edit47.Text:=S; Str(Cmin:1:3,S); Edit52.Text:=S; bsSkinMaskEdit2.Text:= TimeToStr(Time);
end;

procedure TfStatistic.inicial;
var v:real; cod:integer;
begin
  edit23.ReadOnly:=false; edit24.ReadOnly:=false;
  edit25.ReadOnly:=false; edit26.ReadOnly:=false;
  edit27.ReadOnly:=false; edit28.ReadOnly:=false;
  edit29.ReadOnly:=false; edit30.ReadOnly:=false;
  edit31.ReadOnly:=false; edit32.ReadOnly:=false;
  edit33.ReadOnly:=false; edit34.ReadOnly:=false;
  edit35.ReadOnly:=false; edit36.ReadOnly:=false;
  edit37.ReadOnly:=false; edit38.ReadOnly:=false;
  edit39.ReadOnly:=false; edit40.ReadOnly:=false;
  edit41.ReadOnly:=false; edit42.ReadOnly:=false;
  edit43.ReadOnly:=false; edit44.ReadOnly:=false;
  if RadioButton3.Checked then begin
    val(Edit23.Text,v,Cod); VBR:=v; val(Edit37.Text,v,Cod); VBR:=VBR+v/60; val(Edit24.Text,v,Cod); VV:=v;
    val(Edit38.Text,v,Cod); VV:=VV+v/60; val(Edit25.Text,v,Cod); H:=v; val(Edit39.Text,v,Cod); H:=H+v/60;
    if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then begin
      val(Edit31.Text,m,Cod); val(Edit32.Text,q,Cod);
    end;
    val(Edit55.Text,cb,Cod); val(Edit56.Text,cv,Cod);
  end;
  if RadioButton4.Checked then begin
    val(Edit26.Text,v,Cod); VBR1:=v; val(Edit40.Text,v,Cod); VBR1:=VBR1+v/60; val(Edit27.Text,v,Cod); VV1:=v;
    val(Edit41.Text,v,Cod); VV1:=VV1+v/60; val(Edit28.Text,v,Cod); VBR2:=v; val(Edit42.Text,v,Cod);
    VBR2:=VBR2+v/60; val(Edit29.Text,v,Cod); VV2:=v; val(Edit43.Text,v,Cod); VV2:=VV2+v/60;
    if bsSkinCheckRadioBox8.Checked then begin
      val(Edit33.Text,m1,Cod); val(Edit34.Text,q1,Cod); val(Edit35.Text,m2,Cod); val(Edit36.Text,q2,Cod);
    end;
    val(Edit58.Text,cb1,Cod); val(Edit59.Text,cv1,Cod); val(Edit60.Text,cb2,Cod); val(Edit61.Text,cv2,Cod);
  end;
  val(Edit30.Text,v,Cod); VP:=v; val(Edit44.Text,v,Cod); VP:=VP+v/60; val(Edit54.Text,cp,Cod);
end;

procedure TfStatistic.inicial1;
var v:real; cod:integer;
begin
  VBR:=moVBR; VV:=moVV; m:=nChBR; q:=nCHV; val(Edit25.Text,v,Cod); H:=v; val(Edit39.Text,v,Cod);
  H:=H+v/60; VBR1:=moVBR1; VV1:=moVV1; m1:=nChBR1; q1:=nCHV1; VBR2:=moVBR2; VV2:=moVV2;
  m2:=nChBR2; q2:=nCHV2; VP:=moVP;
  if RadioButton3.Checked then begin
    val(Edit55.Text,cb,Cod); val(Edit56.Text,cv,Cod);
  end;
  if RadioButton4.Checked then begin
    val(Edit58.Text,cb1,Cod); val(Edit59.Text,cv1,Cod); val(Edit60.Text,cb2,Cod); val(Edit61.Text,cv2,Cod);
  end;
  val(Edit54.Text,cp,Cod);
end;

procedure TfStatistic.Edit23KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
beginif Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit37KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
```

```
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit55KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit24KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit38KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit56KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit25KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit39KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit26KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit40KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit27KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit41KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit58KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit59KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit28KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit42KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit60KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit29KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit43KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit61KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit30KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.Edit44KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
begin if Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;
```

```
procedure TfStatistic.Edit54KeyPress(Sender: TObject; var  Key: Char);
beginif Not(Key in ['0'..'9','.']) then Key:=#27; end;

procedure TfStatistic.bsSkinButton2Click(Sender: TObject);
begin
  with  TForm7.Create(nil) do
  try
    showModal;
  finally
    free;
  end;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton5Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton3Click(Sender: TObject);
begin
  RadioButton5.Checked:=true;  RadioButton9.Checked:=false;  RadioButton10.Checked:=false;
  RadioButton8.Checked:=false;  RadioButton6.Checked:=false;  RadioButton7.Checked:=false;
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton4Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton6Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=true;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton7Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=true;  Edit39.Enabled:=true;  Edit32.Enabled:=true;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton8Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton9Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.RadioButton10Click(Sender: TObject);
begin
  Edit25.Enabled:=false;  Edit39.Enabled:=false;  Edit32.Enabled:=false;
end;

procedure TfStatistic.bsSkinButton3Click(Sender: TObject);
var Form5 :TForm5;
begin
  Form5:= TForm5.Create(nil);
  with  Form5 do
  try
    showModal;
```

```
  finally
    free;
  end;
end;

procedure TfStatistic.bsSkinButton4Click(Sender: TObject);
begin
  with  TForm6.Create(nil) do
  try
    showModal;
  finally
    free;
  end;
end;

procedure TfStatistic.FormActivate(Sender: TObject);
begin
  if moVBR<>0 then begin
    Edit23.Text:=FloatToStr(Trunc(moVBR)); Edit37.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVBR)*60)); m:=nChBR;
  end;
  if moVV<>0 then begin
    Edit24.Text:=FloatToStr(Trunc(moVV)); Edit38.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVV)*60)); q:=nCHV;
  end;
  if moVBR1<>0 then begin
    Edit26.Text:=FloatToStr(Trunc(moVBR1)); Edit40.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVBR1)*60)); m1:=nChBR1;
  end;
  if moVV1<>0 then begin
    Edit27.Text:=FloatToStr(Trunc(moVV1)); Edit41.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVV1)*60)); q1:=nCHV1;
  end;
  if moVBR2<>0 then begin
    Edit28.Text:=FloatToStr(Trunc(moVBR2)); Edit42.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVBR2)*60)); m2:=nChBR2;
  end;
  if moVV2<>0 then begin
    Edit29.Text:=FloatToStr(Trunc(moVV2)); Edit43.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVV2)*60)); q2:=nCHV2;
  end;
  if moVP<>0 then begin
    Edit30.Text:=FloatToStr(Trunc(moVP)); Edit44.Text:= FloatToStr(Trunc(Frac(moVP)*60)); VP:=moVP;
  end;
end;

procedure TfStatistic.bsZvitClick(Sender: TObject);
var
 zakon, gipoteza, erl1,erl2, i,j,k, p:integer; syst: string; h,x:integer; xx: array of real;

begin
  if dm._a.Active then
    dm._a.Close;
  dm._a.SelectSQL.Clear;
  dm._a.SelectSQL.Add('execute block returns (sistema var char(50), st integer, CHBR_t1 integer, CHBR_t2 integer,
CHB_t1 integer, CHB_t2 integer, Rez_t1 integer, Rez_t2 integer, C1 double precision, C2 double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('zakon integer, n1Erlang integer, n2Erlang integer, TO1 integer, TO2 integer, cTO double
precision, KG_t var char(16), KG_max double precision, C_t var char(16), C_max double precision,');
  dm._a.SelectSQL.Add('Sr_t var char(16), Sr_max double precision, groups integer) as beginend');
  dm._a.CacheOpen;
  if (dm._a.Active) then
    if (dm._a.IsEmpty) then begin
      if ppp[1]>0.05 then
        gipoteza:= 1  elsegipoteza:= 0;
      if RadioButton3.Checked then begin
        syst:='Однокомпонентна система';
        if RadioButton5.Checked then
          p:=1;
```

```
    if RadioButton6.Checked then
      p:=2;
    if RadioButton7.Checked then
      p:=3;
    if bsSkinCheckRadioBox1.Checked then
      zakon:= 0
    else
      zakon:= 1;
    erl1:= StrToInt(Edit31.Text); erl2:= StrToInt(Edit32.Text);
  end else begin
    syst:='Двокомпонентна система';
    if RadioButton8.Checked then
      p:=4;
    if RadioButton9.Checked then
      p:=5;
    if RadioButton10.Checked then
      p:=6;
    if bsSkinCheckRadioBox8.Checked then
      zakon:= 0  elsezakon:= 1;
  end;
  if RadioButton3.Checked then begin
    dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22],
     [syst,p, StrToInt(Edit23.Text),StrToInt(Edit37.Text),StrToInt(Edit24.Text),StrToInt(Edit38.Text),
      StrToInt(Edit25.Text),StrToInt(Edit39.Text),
      StrToFloat(Edit55.Text),StrToFloat(Edit56.Text),
      zakon, erl1,erl2,StrToInt(Edit30.Text),StrToInt(Edit44.Text),StrToFloat(Edit54.Text),
      Edit48.Text,StrToFloat(Edit49.Text), Edit45.Text,StrToFloat(Edit46.Text),
      Edit47.Text,StrToFloat(Edit52.Text), 1], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
  end else begin
    erl1:= StrToInt(Edit33.Text); erl2:= StrToInt(Edit34.Text);
    dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22],
     [syst,p, StrToInt(Edit26.Text),StrToInt(Edit40.Text),StrToInt(Edit27.Text),StrToInt(Edit41.Text),
      0,0, StrToFloat(Edit58.Text),StrToFloat(Edit59.Text),
      zakon, erl1,erl2,StrToInt(Edit30.Text),StrToInt(Edit44.Text),StrToFloat(Edit54.Text),
      Edit48.Text,StrToFloat(Edit49.Text),
      Edit45.Text,StrToFloat(Edit46.Text),
      Edit47.Text,StrToFloat(Edit52.Text), 2], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
     erl1:= StrToInt(Edit35.Text);
     erl2:= StrToInt(Edit36.Text);
    dm._a.CacheModify([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22],
     [syst,p, StrToInt(Edit28.Text),StrToInt(Edit42.Text),StrToInt(Edit29.Text),StrToInt(Edit43.Text),
      0,0, StrToFloat(Edit60.Text),StrToFloat(Edit61.Text),
      zakon, erl1,erl2,StrToInt(Edit30.Text),StrToInt(Edit44.Text),StrToFloat(Edit54.Text),
      Edit48.Text,StrToFloat(Edit49.Text), Edit45.Text,StrToFloat(Edit46.Text),
      Edit47.Text,StrToFloat(Edit52.Text), 3], 2);//0: Edit; 1: Insert; 2: Append;
  end;
end;
if dm._b.Active then
  dm._b.Close;
dm._b.SelectSQL.Clear;
dm._b.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision) as beginend');
dm._b.CacheOpen;
if dm._c.Active then
  dm._c.Close;
dm._c.SelectSQL.Clear;
dm._c.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision) as beginend');
dm._c.CacheOpen;
if dm._d.Active then
  dm._d.Close;
dm._d.SelectSQL.Clear;
dm._d.SelectSQL.Add('execute block returns (x double precision, y double precision) as beginend');
dm._d.CacheOpen;
```

```
      setLength(xx,50+1); h:=round(maximum/Dist);  k:= round(maximum/50);
      if h<1 then h:=1;
      for i:= 1 to 50 do begin
        if i=1 then begin
          p:=0; xx[i]:= 1/h;
        end else begin
          p:=p+k; xx[i]:= p/h;
        end;
      end;
    if (dm._b.Active) then
     if (dm._b.IsEmpty) then begin
       p:=0;
       for i:= 1 to 50 do begin
         if i=1 then begin
           dm._b.CacheModify([0,1],[xx[i],KG[i]],2);
         end else begin
           p:=p+k;
           dm._b.CacheModify([0,1],[xx[i],KG[p]],2);
         end;
       end;
     end;
     p:=0;
     for i:= 1 to 50 do begin
       if i=1 then begin
           dm._c.CacheModify([0,1],[xx[i],Prib[i]],2);
       end else begin
           p:=p+k;
           dm._c.CacheModify([0,1],[xx[i],Prib[p]],2);
       end;
     end;
     p:=0;
     for i:= 1 to 50 do begin
       if i=1 then begin
           dm._d.CacheModify([0,1],[xx[i],Zatr[i]],2);
       end else begin
           p:=p+k;
           dm._d.CacheModify([0,1],[xx[i],Zatr[p]],2);
       end;
     end;
     xx:=nil; GenerateReport('CharakteristicsSolve.fr3');
    dm.frxReport1.ShowReport;
    if dm._a.Active then
      dm._a.Close;
    if dm._b.Active then
      dm._b.Close;
    if dm._c.Active then
      dm._c.Close;
    if dm._d.Active then
      dm._d.Close;
end;

end.
```

Графічні модулі

Модуль коефіцієнта готовності

```
unit GR_KG;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine,
Chart, Series, BusinessSkinForm,  Menus, bsSkinCtrls, Teeprevi, bsSkinShellCtrls, ImgList, bsPngImageList;
```

```
type
  TForm7 = class(TForm)
    Chart1: TChart;
    Series1: TLineSeries;
    bsBusinessSkinForm2: TbsBusinessSkinForm;
    bsSkinMainMenuBar1: TbsSkinMainMenuBar;
    bsSkinMainMenu1: TbsSkinMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    ffff1: TMenuItem;
    bsSkinSavePictureDialog1: TbsSkinSavePictureDialog;
    N3: TMenuItem;
    N4: TMenuItem;
    clipboard1: TMenuItem;
    bsPngImageList1: TbsPngImageList;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
    procedure ffff1Click(Sender: TObject);
    procedure clipboard1Click(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form7: TForm7;

implementation

uses OnlyCode, main;

{$R *.dfm}

procedure TForm7.FormCreate(Sender: TObject);
var i,h,maxim,x:integer;   xx: array of real;
begin
    setLength(xx,maximum+1);    h:=round(maximum/Dist);
    if h<1 then h:=1;
  for i:= 1 to maximum do begin
    xx[i]:=(i/h);
  end;
  with  Chart1 do begin
    for i:= 1 to maximum-1 do begin
      Series1.AddXY(xx[i], KG[i]);
    end;
  end;
end;

procedure TForm7.N2Click(Sender: TObject);
begin
  ChartPreview(Form7,Chart1);
end;

procedure TForm7.ffff1Click(Sender: TObject);
var
  fname:string;
begin
  if bsSkinSavePictureDialog1.Execute then begin
    fname:=bsSkinSavePictureDialog1.FileName;  Chart1.SaveToBitmapFile(fname);
```

```
  end;
end;

procedure TForm7.clipboard1Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.CopyToClipboardBitmap;
end;

procedure TForm7.N4Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.PrintLandscape;
end;

end.
```

Модуль середнього прибутку

```
unit GR_ser_prib;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, bsSkinCtrls,
BusinessSkinForm,Printers, Menus, ImgList,  bsPngImageList,Teeprevi, bsSkinShellCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls,
TeeProcs,  Chart;

type
  TForm5 = class(TForm)
    Chart1: TChart;
    Series1: TLineSeries;
    bsSkinSavePictureDialog1: TbsSkinSavePictureDialog;
    bsSkinMainMenuBar1: TbsSkinMainMenuBar;
    bsSkinMainMenu1: TbsSkinMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    clipboard1: TMenuItem;
    ffff1: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N4: TMenuItem;
    bsPngImageList1: TbsPngImageList;
    bsBusinessSkinForm2: TbsBusinessSkinForm;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure clipboard1Click(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
    procedure ffff1Click(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form5: TForm5;

implementation

uses main, OnlyCode;

{$R *.dfm}

procedure TForm5.FormCreate(Sender: TObject);
var i,h,maxim,x:integer;   xx: array of real;
```

```
begin
   setLength(xx,maximum+1);  h:=round(maximum/Dist);
   if h<1 then h:=1;
   for i:= 1 to maximum do begin
     xx[i]:=(i/h);
   end;
   with  Chart1 do begin
     for i:= 1 to maximum-1 do begin
       Series1.AddXY(xx[i], Prib[i]);
     end;
   end;
end;

procedure TForm5.clipboard1Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.CopyToClipboardBitmap;
end;

procedure TForm5.N4Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.PrintLandscape;
end;

procedure TForm5.ffff1Click(Sender: TObject);
var
  fname:string;
begin
  if bsSkinSavePictureDialog1.Execute then begin
    fname:=bsSkinSavePictureDialog1.FileName;
    Chart1.SaveToBitmapFile(fname);
  end;
end;

procedure TForm5.N2Click(Sender: TObject);
begin
  ChartPreview(Form5,Chart1);
end;

end.
```

Модуль середніх затрат

```
unit GR_ser_zatr;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, var iants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, BusinessSkinForm, Menus,
bsSkinCtrls,Printers, TeEngine, Series,  ExtCtrls, TeeProcs,Teeprevi, Chart, bsSkinShellCtrls, ImgList,
bsPngImageList;

type
  TForm6 = class(TForm)
    bsBusinessSkinForm1: TbsBusinessSkinForm;
    bsSkinMainMenuBar1: TbsSkinMainMenuBar;
    bsPngImageList1: TbsPngImageList;
    bsSkinMainMenu1: TbsSkinMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    clipboard1: TMenuItem;
    ffff1: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N4: TMenuItem;
```

```
    bsSkinSavePictureDialog1: TbsSkinSavePictureDialog;
    Chart1: TChart;
    Series1: TLineSeries;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure clipboard1Click(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
    procedure ffff1Click(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form6: TForm6;

implementation

uses main, OnlyCode;

{$R *.dfm}

procedure TForm6.FormCreate(Sender: TObject);
var i,h,maxim,x:integer;  xx: array of real;
begin
    setLength(xx,maximum+1); h:=round(maximum/Dist);
    if h<1 then h:=1;
  for i:= 1 to maximum do begin
    xx[i]:=(i/h);
  end;
  with  Chart1 do begin
    for i:= 1 to maximum-1 do begin
      Series1.AddXY(xx[i], Zatr[i]);
    end;
  end;
end;

procedure TForm6.clipboard1Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.CopyToClipboardBitmap;
end;

procedure TForm6.N4Click(Sender: TObject);
begin
  Chart1.PrintLandscape;
end;

procedure TForm6.ffff1Click(Sender: TObject);
var
  fname:string;
begin
  if bsSkinSavePictureDialog1.Execute then begin
    fname:=bsSkinSavePictureDialog1.FileName;
    Chart1.SaveToBitmapFile(fname);
  end;
end;

procedure TForm6.N2Click(Sender: TObject);
begin
  ChartPreview(Form6,Chart1);
end;
```

end.

Приклад статистичного звіту підготовленого модуля «ForestMashinery»

Звіт по статистичному обробітку законів розподілу часу безвідмовної роботи та часу відновлення

Загальна статистика для однокомпонентної системи

Назва параметра	Значення
Статистика відмов ЧБР	
Середнє (мат. очікування)	
Стд. відхилення	1.9359716
Коефіцієнт варіації	0.6070991
Стд. помилка середнього	0.6453238
Медіана	3.4
Дисперсія	10.169012
Асиметрія	-0.007067
Ексцес	1.5659536
Розмах	2.625
Мінімум	0.75
Максимум	6
Сума	28.7

Закон розподілу: Нормальний Гіпотеза: Не суперечить

Chi-Square = **4.4160755** Df = **2** P = **0.1**

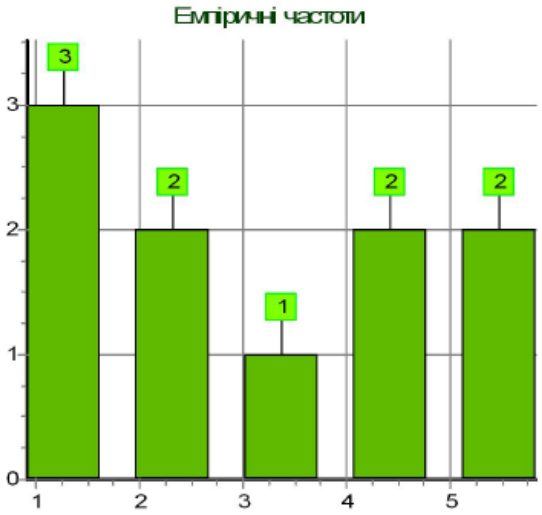
Статистика відмов ЧВ	
Середнє (мат. очікування)	
Стд. відхилення	5.2498214
Коефіцієнт варіації	0.6116296
Стд. помилка середнього	1.7499404
Медіана	10
Дисперсія	73.673611
Асиметрія	-0.493638
Ексцес	1.8602176
Розмах	7.375
Мінімум	0.25
Максимум	15
Сума	77.25

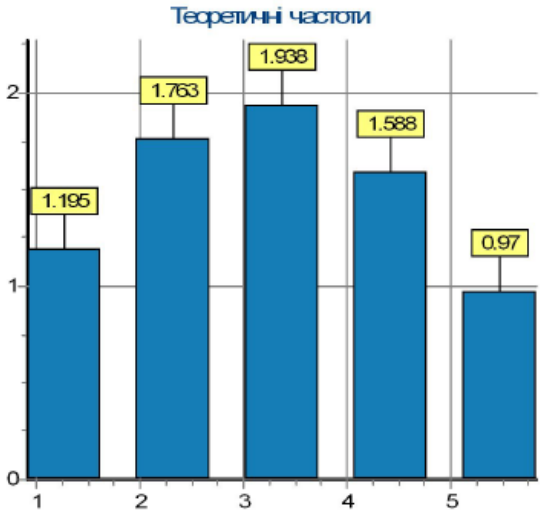
Закон розподілу: Ерланга Гіпотеза: Суперечить

Chi-Square = **7.1773056** Df = **2** P = **0.025**

Частоти часу безвідмовної роботи

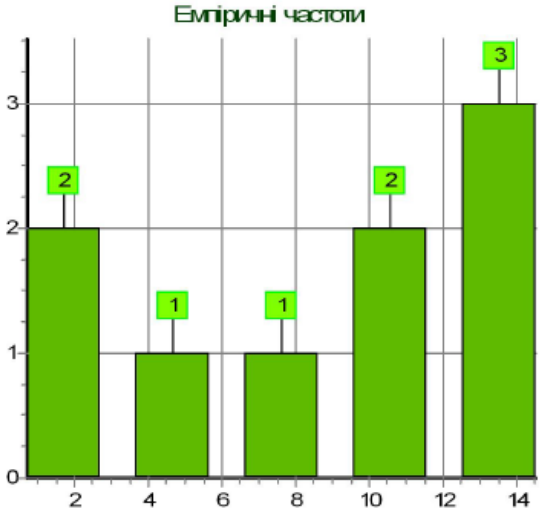
Частотні інтервали	Емпірична частота	Накоплена емпірична частота	% спос-т ереж.	Накопл. %	Теоретична частота	Накоплена емпірична частота	% спос-т ереж.	Накопл. %	Емпірична - Теоретична
.75-1.8	3	3	30	30	1.1946	1.1946	16.027	16.027	1.8054
1.8-2.85	2	5	20	50	1.7628	2.9574	23.65	39.677	0.2372
2.85-3.9	1	6	10	60	1.938	4.8958	26.005	65.682	-0.9384
3.9-4.95	2	8	20	80	1.588	6.484	21.308	86.99	0.4117
4.95-6	2	10	20	100	0.9697	7.4537	13.01	100	1.0303

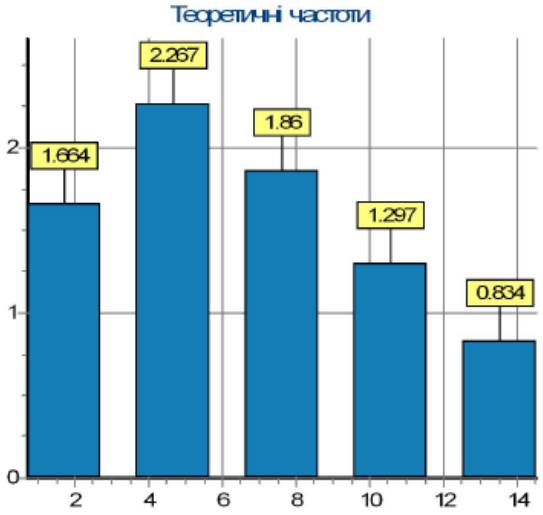




Частоти часу відновлення

Частотні інтервали	Емпірична частота	Накоплена емпірична частота	% спос-т ереж.	Накопл. %	Теоретична частота	Накоплена емпірична частота	% спос-т ереж.	Накопл. %	Емпірична - Теоретична
.25-3.2	2	2	22.222	22.222	1.6635	1.66357	20.999	20.999	0.3364
3.2-6.15	1	3	11.111	33.3333	2.2673	3.9300	28.621	49.621	-1.2673
6.15-9.1	1	4	11.111	44.4444	1.8597	5.79056	23.475	73.096	-0.8597
9.1-12.05	2	6	22.222	66.6667	1.2971	7.0876	16.373	89.469	0.7029
12.05-15	3	9	33.333	100	0.8342	7.9218	10.531	100	2.1658





Створено за допомогою програми ForestMashinery - 08.11.2015 21:10:46

Результат розрахунку характеристик технічної системи

Однокомпонентна система

Стратегія технічного обслуговування: за наробітком

Часова характеристика системи

Час безвідмовної роботи	3 год.	год.	11 хв.	хв.	
Час відновлення	8 год.	год.	34 хв.	хв.	
Резерв	0 год.	год.	30 хв.	хв.	

Вартість години роботи

6	грн.
2	грн.

Закон розподілу:

☒ Нормальний ☐ Ерланга

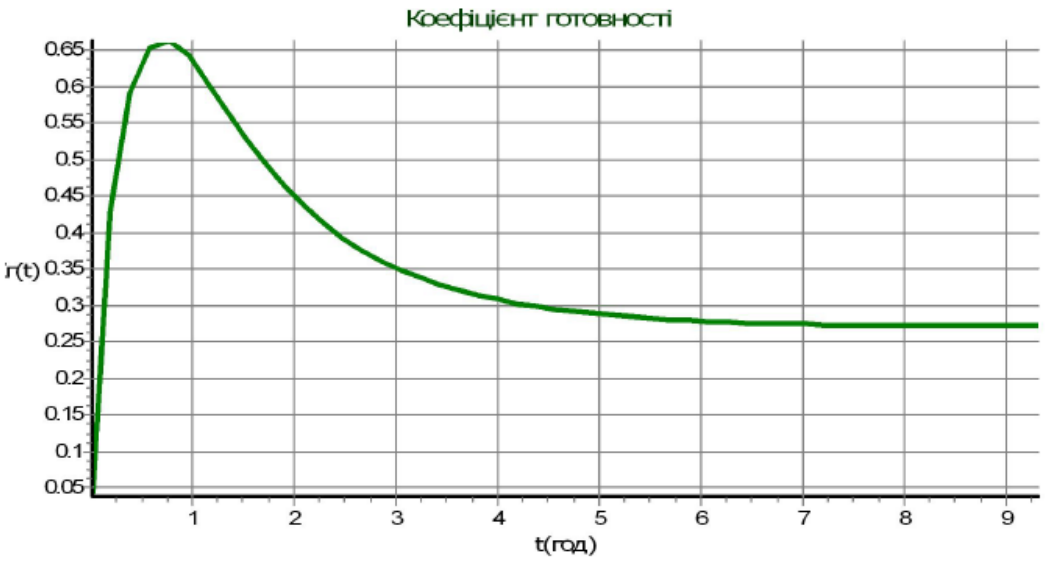
Порядок розподілу Ерланга

Для ЧБР: 4 Для ЧВ: 4

Технічне обслуговування:

Тривалість: 0 год. 15 хв. Вартість години ТО: 1 грн.

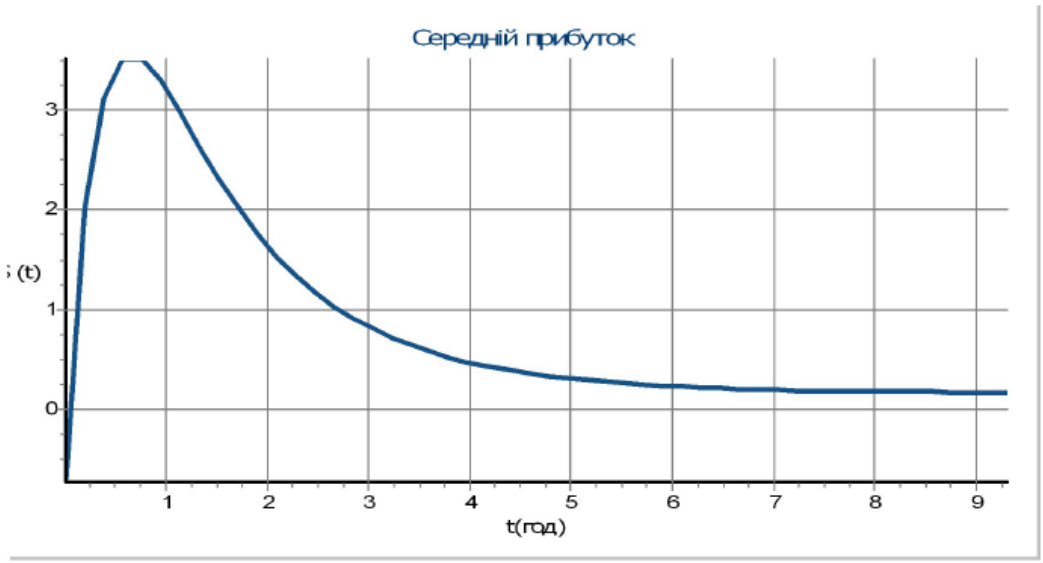
Коефіцієнт технічної готовності



Топтим.:
0 год 42 хв.

Кг max:
0.664

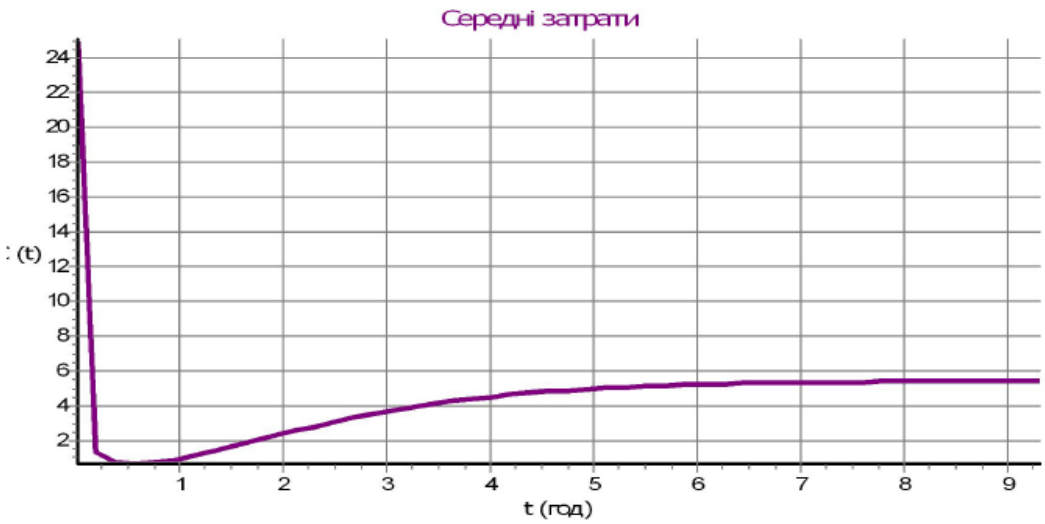
Середній прибуток, грн



Топтим.:
0 год. 33 хв.

S max:
0.624

Середні затрати

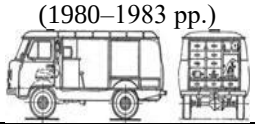
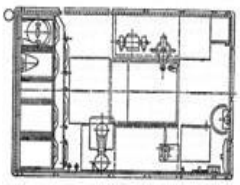


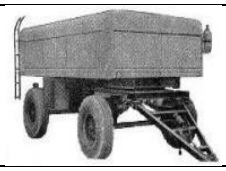
Топтим.:
0 год 39 хв.

C min:
3.55

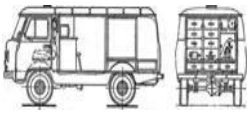
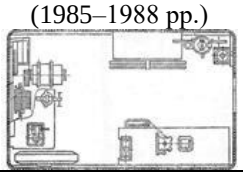
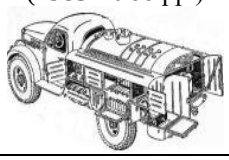
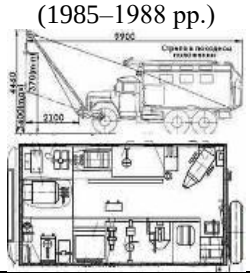
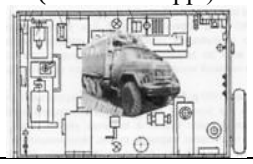
ДОДАТОК Б

Продовження табл. Б.1.

1	2
АТУ-ПД (1970–1972 рр.)	Агрегат, змонтований на базовому шасі автопричепу 2ПТС-4М, для механізації найбільш трудомістких операцій технічного обслуговування: зовнішнє миття, заправлення мастильними матеріалами, мащення вузлів і агрегатів, промивання системи мащення, ремонтування. Схематично агрегат складався з: двигуна внутрішнього згоряння Д-300; компресора М-155-2; повітряного ресивера для зниження пульсації тиску; вакуумного ресивера з поплавковим клапаном; ємності для води; секційної цистерни для нафтопродуктів (промивної рідини, дизельної оливи, води, автотракторної оливи, відпрацьованої промивної рідини); бункера пневматичного нагнітача консистентного мастила; щита керування; рідинного нагрівача з пультом керування; ніші з відсіками для роздавальних рукавів і ніші для розміщення інструменту; пристроїв і знарядь; монтажного верстата з лещатами.
Агрегат технічного обслуговування АТО-9966Г-БРМЗ. Конструктор ДержНДТІ (1975–1978 рр.)	Призначений для проведення ТО-1 і ТО-2 лісових МЕЗ під час виконання лісотехнічних робіт за температури повітря від 0˚С до +40˚С. Змонтований на базі автомобіля ГАЗ-52-01 та укомплектований набором інструменту загального призначення та різноманітними діагностичними пристроями.
КІ-4270А. За конструкцією ДержНДТІ (1980–1983 рр.) 	Пересувна діагностична установка з обладнанням, змонтована на базі автомобіля УАЗ-452 або УАЗ-451А, для виконання операцій діагностування лісових МЕЗ у разі ТО-3 і періодичного технічного обслуговування, для ресурсного діагностування, а також для виявлення причин складних несправностей і відмов машин.
МПР-9924. (1980–1983 рр.) 	Ремонтно-діагностична майстерня з обладнанням, змонтована на шасі автомобіля ГАЗ-53, для операцій технічного діагностування складальних одиниць і агрегатів тракторів у разі проведення періодичного ТО-3; після напрацювання трактором доремонтного чи міжремонтного ресурсу, а також для виявлення причин несправностей тракторів та їх усунення, складних лісових МЕЗ під час виконання лісотехнічних робіт.
1	2
ЛУАЗ-37031, МТП-817М За конструкцією заводу «Алтай» (1980–1983 рр.)	Основне обладнання майстерень розміщували у кузові на шасі автомобіля ГАЗ-52-01, яке призначалося для ремонту лісових МЕЗ. Мобільні засоби комплектували однаковим обладнанням, але розміщення його в кузові було різне. Майстерні були обладнані: настільно-свердлильним верстатом, слюсарними лещатами, гідравлічним пресом, точильним апаратом, пристроєм для перевірки автотракторного електрообладнання і гідросистем; баком для збирання відпрацьованої оливи, спеціальним трапом; електрозварювальним апаратом і т.д.
АТО-1500Г (1981–1983 рр.)	За допомогою агрегату технічного обслуговування та його обладнання, змонтованого на шасі двовісного тракторного причепа 2ПТС-4М, виконували наступні операції: дозаправлення машини мастильними матеріалами і водою; мащення підшипникових вузлів пластичними оливами; заміна відпрацьованої оливи; продування радіаторів, фільтрів і трубопроводів стиснутим повітрям; підкачування шин; миття машин і деталей вузлів. Тобто проведення технічного

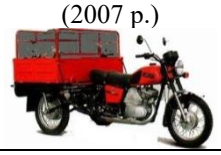
	обслуговування лісових МЕЗ
АТО-9993. За конструкцією ДержНДТІ (1981–1983 рр.) 	За допомогою агрегату технічного обслуговування та його обладнання, змонтованого на самохідному шасі Т-16М, виконували наступні операції: очищення і миття гарячою водою машин, деталей і складових одиниць; дозаправлення машини мастильними матеріалами і водою; мащення підшипникових вузлів консистентним мастилом; доливання води в систему охолодження; оцінювання стану рульового керування; визначення стану лісових МЕЗ та їх регулювання; стану акумуляторних батарей; регулювання зазорів клапанів двигуна та ін.
АТО-9966В. За конструкцією ДержНДТІ (1981–1983 рр.) 	За допомогою агрегату технічного обслуговування та його обладнання, змонтованого на шасі одновісного причепа 2ПТС-4М, виконували наступні операції: механізоване очищення і миття; механізована заправка оливою і водою; фарбування; нанесення антикорозійного мастила у разі постачання або зберігання машин; проведення окремих слюсарних операцій: свердління, шліфування, заточування інструмента та ін.; продування радіатора стисненим повітрям і накачування шин; збирання відпрацьованих нафтопродуктів і води тощо
1	2
АТО-9984. За конструкцією ДержНДТІ (1981–1983 рр.) 	Агрегатом технічного обслуговування та його обладнанням, розміщеним на шасі тракторного причепа Т-16М, виконували наступні операції: встановлення машин на підставки; обдування і сушіння вологих поверхонь стиснутим повітрям; нанесення різних видів консерваційних матеріалів і лакофарбових покриттів; приготування робочих консерваційних сумішей для консервування внутрішніх поверхонь (трансмісій, ходової частини, навісного обладнання і дизельної паливної апаратури); перевірка натягу пасів та заряджання акумуляторних батарей і т.д. Тобто проведення технічного обслуговування у разі підготовки лісових МЕЗ до зберігання
АТО-1768А. За конструкцією ДержНДТІ (1981–1983 рр.)	Агрегатом технічного обслуговування та його обладнанням, розміщеним на шасі тракторного причепа Т-16М, виконували наступні операції: механізоване миття й очищення машин; миття деталей і вузлів у промивальній рідині; дозоване видавання мастильних матеріалів; механізоване збирання відпрацьованої рідини; промивання системи мащення вимкненого двигуна; підігрівання води і мастильних матеріалів; дозаправка машини дизельним паливом; до заливання охолоджувальної рідини; продування середини радіаторів стисненим повітрям; підкачування колісних шин; перевірка ланцюгів лісових МЕЗ, нанесення антикорозійного покриття і фарбування машин; усунення дрібних технічних несправностей; контроль і регулювання механізмів двигуна та окремих вузлів; мащення підшипникових вузлів консистентними мастилами і т.д. Тобто проведення ТО-1 і ТО-2 лісових МЕЗ під час виконання лісопромислових робіт
Пересувна ремонтно-діагностична установка Виробник Латвія (1983–1986 рр.) 	Обладнання майстерні, розміщене на базі автомобіля ІЖ-2715, дозволяло оперативно виконувати діагностування, технічне обслуговування, усувати несправності лісових МЕЗ. У салоні автомобіля розміщували верстак закритого типу з лещатами і висувними ящиками, в яких зберігалося 25 різноманітних діагностичних пристроїв. Із боків кузова встановлювали швидкоз'ємні щити з інструментом, які закріплювали за допомогою затискних губок, що дозволяло комплектувати пересувну майстерню набором обладнання, необхідним для проведення конкретного виду робіт.

Продовження табл. Б.1.

1	2
КІ-13905(М) (1985–1988 рр.) 	Діагностична установка та її обладнання, змонтоване на базі автомобіля, для виявлення й усування несправності машин у міжконтрольний період, для діагностування лісових МЕЗ під час ТО-3 і після міжремонтного наробітку та діагностування лісових МЕЗ після завершення лісотехнічних робіт. У вантажному відділенні автомобіля розміщували: стетоскоп; пристрій для визначення правильності налаштування і придатності запобіжних муфт; набори пристроїв та інструменту загального призначення.
КІ-13925 (1985–1988 рр.)	Пересувна діагностична установка з обладнанням, розміщеним у кузові автомобіля «Москвич» ІЖ-2718, для діагностування лісових МЕЗ під час ТО-2, ТО-3 і після міжремонтного наробітку.
МПР-3901-КМЗ. За конструкцією ДержНДТІ (1985–1988 рр.) 	Автопересувна ремонтна майстерня, змонтована на шасі автомобіля ГАЗ-52-01 й укомплектована: генератором, зварювальним пристроєм на одновісному причепі, настільно-свердлильним верстатом, гідравлічним пресом, точильно-шліфувальним верстатом, електродрилем, ацетиленовим генератором, тобто обладнанням, яке використовували при усуванні несправностей і наслідків відмов лісових МЕЗ під час виконання лісотехнічних робіт.
АТО-9994 (1985–1988 рр.) 	Агрегат, змонтований на шасі автомобіля ГАЗ-52-01, виконував на лісопромислових ділянках ТО-1 і ТО-2 лісових МЕЗ. На рамі агрегату розміщували: насос високого тиску з приладами, пристроями та ємності для води, бензину, промивної рідини, солідолу, відпрацьованої промивальної рідини і нафтопродуктів.
МТО-АТ (1985–1988 рр.) 	Майстерня монтувалась на базі автомобіля ЗІЛ-131 та комплектувалась: пристроєм для перевірки електрообладнання Е-216; електровулканічним апаратом; верстаком; електрошліфувальною машиною; підйомним краном, тобто обладнанням, яке використовували при усуванні несправностей і наслідків відмов лісових МЕЗ під час виконання лісотехнічних робіт
ЗІЛ-131 МПМ (1985–1988 рр.) 	Механічна ремонтна майстерня, призначена для виконання токарних, фрезерних, свердлильних робіт під час ремонту лісових МЕЗ. Майстерня мала свій генератор; три робочі місця; чотири місця для відпочинку; слюсарно-гвинтовий верстат; ящик для зберігання пристрою газового зварювання; свердлильний верстат; заправні місткості тощо.

Продовження табл. Б.1.

1	2
ПАРМ-4909. ВАТ Автомобільний завод Урал (2007 р.) 	Авторемонтна майстерня на базі автомобіля Урал-43203-41 призначена для діагностування, ТОР лісових МЕЗ. У вантажному відділені автомобіля розміщені: верстати столярно-гвинтовий і точильно-шліфувальний; генератор; електровулканізатор; пристрій для свердління; вантажопідіймальний пристрій; прес гідравлічний; генератор зварювальний; переносна газозварювальна установка; верстак та ін.
ПАРМ-4784. Азнакаївський завод «Нафтомаш» (2007 р.)	Агрегат та його обладнання, змонтоване на базі Урал 4320-1912, КамАЗ 43114-1029, для виконання слюсарно-механічних, зварювальних, газозварювальних і токарних операцій, тобто операцій технічного обслуговування автотракторної техніки у польових умовах. У вантажному відділенні автомобіля розміщені: настільно-свердлильний верстат, зварювальне обладнання, обладнання для газового різання, кран-укосина з талю та ін.

ПАРМ-58491N. Азнакаївський завод «Нафтомаш» (2007 р.) 	Авторемонтна майстерня, змонтована на базі Урал 4320-1152-41, призначена для діагностування, технічного обслуговування, поточного ремонту лісових МЕЗ. Її основне обладнання: газорізальна установка, комплект зварювального обладнання, набір інструменту тощо.
КІ-28016. ЗАО НТЦ «Екологічний сервіс» (2007 р.) 	Пересувна ремонтно-діагностична майстерня призначена для діагностування, регулювання і дрібного ремонту під час ТОР лісових МЕЗ (у т. ч. техніки іноземного виробництва), причіпного обладнання, а також виконання дилерських послуг із передпродажної підготовки техніки. Пост обладнують необхідним обладнанням і діагностичними пристроями для проведення вищеперерахованих робіт на базі автомобіля-фургона: УАЗ-3741/2206/3962; ГАЗ-3307; ЗІЛ-5301; «Газель» та ін.
КІ-28201. ЗАТ НТЦ «Екологічний сервіс», (2007 р.) 	Пересувний ремонтно-діагностичний пост призначений для діагностування лісових МЕЗ, а також усунення несправностей, виконання регулювання гідроагрегатів і двигунів. Пост виконано на шасі мотоцикла «ІЖ-Юпітер/Планета-5». Набір інструменту загального призначення, а також діагностичних пристроїв для виконання вищеперерахованих робіт розміщено у візку мотоцикла

Продовження табл. Б.1.

1	2
КІ-28012. ЗАТ НТЦ «Екологічний сервіс», (2007 р.) 	Діагностична пересувна установка на базі ЗІЛ-5301/4331/4334-22 або ГАЗ-337/3308/3309 призначена для виявлення й усунення несправностей агрегатів машин (у тому числі техніки іноземного виробництва), зчіпного обладнання, а також виконання дилерських послуг з передпродажної підготовки лісових МЕЗ. До її складу входить набір інструменту загального призначення та діагностичні пристрої для виконання техробіт
КІ-28106 (01,02). ЗАТ НТЦ «Екологічний сервіс», (2007 р.) 	Пересувний пост, обладнаний необхідними пристосуваннями і діагностичними приладами, для проведення автоматизованого контролю технічного стану всіх типів самохідних машин за вимогами екологічної та технічної безпеки з використанням нових алгоритмів і комп'ютерних програм (КІ-28106 на шасі автомобіля «Газель»; КІ-28106.01 на шасі «Соболь чи «Баргузин»; КІ-28106.02 на шасі автомобіля УАЗ). Габаритні розміри 5500х2074х2270 мм, повна вага 3500 кг
Спец-сервісний автомобіль корпорації "АГКО", (2007-2012 рр.) 	Призначений для оперативного виконання комплексу робіт з надання технічних послуг лісовим МЕЗ (діагностування, технічне обслуговування, усунення несправностей та ремонт лісових МЕЗ та іншої техніки вітчизняного й іноземного виробництва). За висновками спеціалістів комплектність автомобіля потребує кваліфікаційних сервісних механіків, що дозволяє усувати значну частину відмов ІІІ групи складності. Аналогічні сервісні машини створено і в Україні за участю НАК „Украгролізинг". У вантажному відділенні автомобіля розміщено слюсарний інструмент, діагностичні прилади, автоматичне джерело живлення зі зварювальним пристроєм, компресор, мийний пристрій високого тиску, портативний комп'ютер
Спеціалізований	Призначений для оперативного виконання комплексу робіт з надання технічних

сервісний автомобіль корпорації «Амако» м. Київ (2008-2012 рр.)	послуг лісогосподарським виробникам (діагностування, технічне обслуговування, усунення несправностей та ремонт лісових МЕЗ та іншої техніки вітчизняного й іноземного виробництва). У вантажному відділені автомобіля розміщено: електрогенератор; повітряний трифазний компресор; зварювальний та газозварювальний агрегати; портативний електродриль; свердлильний верстат; кутова шліфувальна машина; точильний верстат із диском; манометр; редуктор тиску; асортимент з 151 одиниці ручного інструменту; набір свердел; набір пневматичного обладнання.

Додаток В

Програмний блок

```
* Моделювання експоненціальних функцій роботи і відновлення

10 FUN421   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,7.39/0.20,15.66/0.30,25.03/0.40,35.84/0.50,48.64/
0.60,64.29/0.70,84.48/0.75,97.27/0.80,112.93/0.84,128.59/0.88,148.77/
0.90,161.56/0.92,177.22/0.94,197.41/0.95,210.20/0.96,225.86/0.97,246.04/
0.98,274.49/0.99,323.13/0.99,371.77/1.00,436.06/1.00,484.69/1.00,597.62/

30 FUN49   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,1.29/0.20,2.73/0.30,4.37/0.40,6.26/0.50,8.49/
0.60,11.22/0.70,14.75/0.75,16.98/0.80,19.72/0.84,22.45/0.88,25.97/
0.90,28.21/0.92,30.94/0.94,34.46/0.95,36.70/0.96,39.43/0.97,42.96/
0.98,47.92/0.99,56.41/0.99,64.90/1.00,76.13/1.00,84.62/1.00,104.34/

* Оператори моделі
110  generate 10                    ;генерація заявок в чергу
120  queue Cherga_1                 ;формування черги
150  seize device                   ;назва пристрою
160  depart Cherga_1                ;видалення з черги на обслуговування
170  advance 10                     ;затримка черги на 10 одиниць м.ч. на час
                                    проведення ТО
180  release device                 ;пристрій на обслуговуванні
190  terminate

400  generate 300
410  seize p_device                 ;надходження пристрою device в умовний
                                    пристрій де проходить ТО
411  funavail device,re,ttt
413  funavail pered_vidmova,re,ttt  ;новий блок для транзакту
420  advance 16                     ;затримка черги на 16 одиниць м.ч. у пристрої
                                    pered_vidmova
421  favail device                  ;блокування пристрою device
423  favail pered_vidmova           ;блокування пристрою pered_vidmova
430  release p_device
440  seize pered_vidmova
450  advance fn$FUN421
```

```
451  advance fn$FUN421
452  advance fn$FUN421
453  advance fn$FUN421
454  advance fn$FUN421
455  advance fn$FUN421
460  release pered_vidmova          ;вихід з пристрою після затримки
480  seize o_device                 ;попадання в пристрій, імітація відмови
481  funavail device,re,ttt         ;новий блок для транзакту
490  advance fn$FUN49
491  advance fn$FUN49
492  advance fn$FUN49
493  advance fn$FUN49
494  favail device                  ;звільнення пристрою
500  release o_device

510 ttt terminate

1000  generate 65000
1001  terminate 1

start 1                             ;видача статистики, припинення моделювання
```

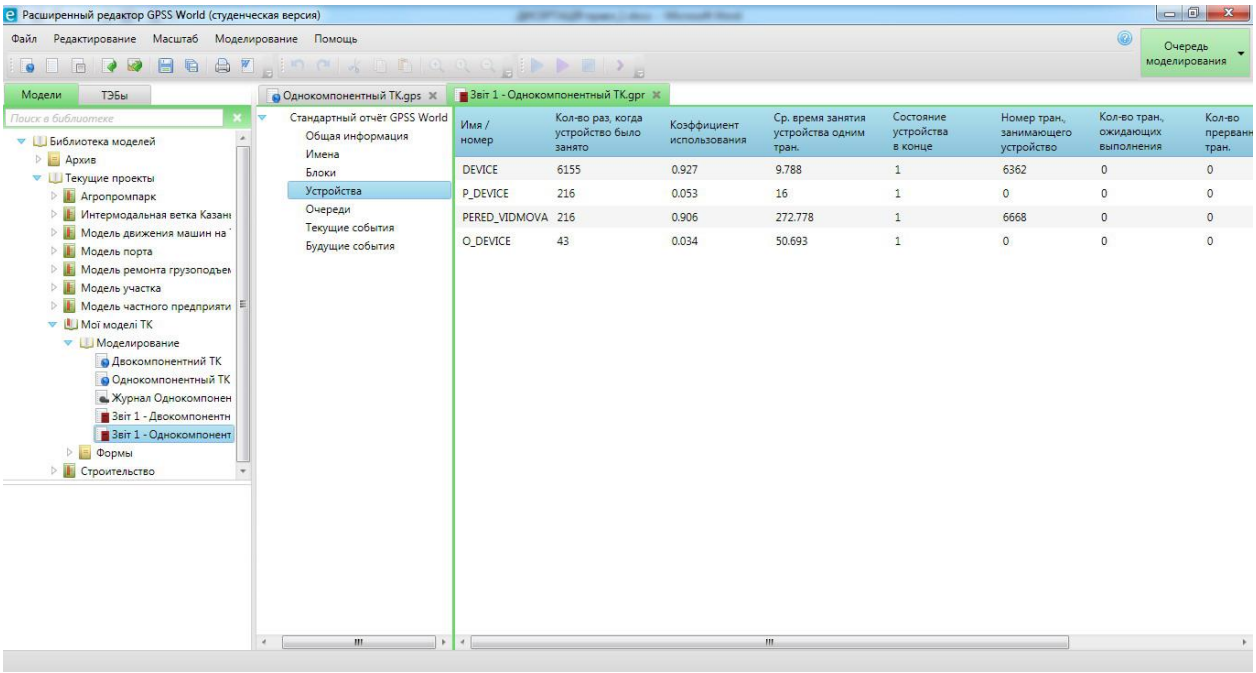


Рис. В.1. Скріншот розрахунку однокомпонентної моделі (GPSS World)

Загальна інформація

Час початку	Кінцевий час	Кількість блоків	Кількість пристроїв	Кількість багатоканальних пристроїв
0	65000	34	4	0

Імена

Ім’я	Значення
CHERGA_1	10002.000

DEVICE	10003.000
FUN421	10000.000
FUN49	10001.000
O_DEVICE	10006.000
PERED_VIDMOVA	10005.000
P_DEVICE	10004.000
TTT	32.000

Блоки

Мітка	Поз. блоку	Тип блоку	Кільк. транзактів у блоці	Кільк. транзактів у кінці моделювання	Кільк. транзактів очікуючих
	1	GENERATE	6499	0	0
	2	QUEUE	6499	344	0
	3	SEIZE	6155	0	0
	4	DEPART	6155	0	0
	5	ADVANCE	6155	1	0
	6	RELEASE	5917	0	0
	7	TERMINATE	5917	0	0
	8	GENERATE	216	0	0
	9	SEIZE	216	0	0
	10	FUNAVAIL	216	0	0
	11	FUNAVAIL	216	0	0
	12	ADVANCE	216	0	0
	13	FAVAIL	216	0	0
	14	FAVAIL	216	0	0
	15	RELEASE	216	0	0
	16	SEIZE	216	0	0
	17	ADVANCE	216	0	0
	18	ADVANCE	214	0	0
	19	ADVANCE	196	1	0
	20	ADVANCE	161	0	0
	21	ADVANCE	123	0	0
	22	ADVANCE	80	0	0
	23	RELEASE	43	0	0
	24	SEIZE	43	0	0
	25	FUNAVAIL	43	0	0
	26	ADVANCE	43	0	0
	27	ADVANCE	43	0	0
	28	ADVANCE	43	0	0
	29	ADVANCE	43	0	0
	30	FAVAIL	43	0	0
	31	RELEASE	43	0	0
TTT	32	TERMINATE	452	0	0
	33	GENERATE	1	0	0
	34	TERMINATE	1	0	0

Пристрої

Ім’я	Кільк. раз зайнято	Коеф. викор.	Сер.час одним транзактом	Стан пристар. в кінці	Номер транзакта, що займає пристрій	Кільк. транз. Що очікують	Кільк. транзакті в очікують
DEVICE	6155	0.927	9.788	1	6362	0	344
P_DEVICE	216	0.053	16.000	1	0	0	0
PERED_VIDMOVA	216	0.906	272.778	1	6668	0	0
O_DEVICE	43	0.034	50.693	1	0	0	0

Черги

Ім’я	MAX черги	Поточна черга	Кількість входжень	Кільк. входжень в чергу	Середнє значення черги	Середній час одного	Середній час перебув транз в черзі
CHERGA_1	345	344	6499	29	184.171	1841.99	1850.247

Поточні події

Номер транзакта	Пріоритет транзакта	Час входу транзакта	Номер сімейства транзакта	Номер блоку в якому був транзакт	Номер наступного блоку
6718	0	65000	6718	0	1

Майбутні події

Номер транзакта	Пріоритет транзакта	Час входу транзакта	Номер сімейства транзакта	Номер блоку в якому був транзакт	Номер наступного блоку
6362	0	65006.000	6362	5	6
6668	0	65043.373	6668	19	20
6698	0	65100.000	6698	0	8
6719	0	130000.000	6719	0	33

Результати імітаційного моделювання для «Двокомпонентної моделі з календарним ТО»

* Моделювання експоненціальних функцій роботи і відновлення

```
10 FUN421   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,7.39/0.20,15.66/0.30,25.03/0.40,35.84/0.50,48.64/
0.60,64.29/0.70,84.48/0.75,97.27/0.80,112.93/0.84,128.59/0.88,148.77/
0.90,161.56/0.92,177.22/0.94,197.41/0.95,210.20/0.96,225.86/0.97,246.04/
0.98,274.49/0.99,323.13/0.99,371.77/1.00,436.06/1.00,484.69/1.00,597.62/

20 FUN505   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,8.87/0.20,18.78/0.30,30.02/0.40,42.99/0.50,58.34/
0.60,77.12/0.70,101.33/0.75,116.68/0.80,135.46/0.84,154.24/0.88,178.46/
0.90,193.80/0.92,212.58/0.94,236.80/0.95,252.14/0.96,270.92/0.97,295.14/
0.98,329.26/0.99,387.60/0.99,445.94/1.00,523.06/1.00,581.40/1.00,716.86/

30 FUN49   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,1.29/0.20,2.73/0.30,4.37/0.40,6.26/0.50,8.49/
0.60,11.22/0.70,14.75/0.75,16.98/0.80,19.72/0.84,22.45/0.88,25.97/
0.90,28.21/0.92,30.94/0.94,34.46/0.95,36.70/0.96,39.43/0.97,42.96/
```

```
0.98,47.92/0.99,56.41/0.99,64.90/1.00,76.13/1.00,84.62/1.00,104.34/

40 FUN57   FUNCTION    RN1,C24
0.00,0.00/0.10,1.50/0.20,3.18/0.30,5.08/0.40,7.28/0.50,9.88/
0.60,13.06/0.70,17.16/0.75,19.75/0.80,22.93/0.84,26.11/0.88,30.21/
0.90,32.81/0.92,35.99/0.94,40.09/0.95,42.69/0.96,45.87/0.97,49.97/
0.98,55.75/0.99,65.62/0.99,75.50/1.00,88.56/1.00,98.44/1.00,121.37/

*Перший компонент двокомпонентної системи
110  generate 10                          ;генерація заявок в чергу
120  queue cherga_1                       ;формування черги
150  seize device_1                       ;транзакт завантажує пристрій
160  depart cherga_1                      ;видалення з черги на обслуговування
170  advance 10                           ;затримка черги на 10 одиниць м.ч. на час
                                          проведення ТО
180  release device_1                     ;пристрій на обслуговуванні
250  seize device_2                       ;транзакт завантажує пристрій
270  advance 10                           ;затримка черги на 10 одиниць м.ч. на час
                                          проведення ТО
280  release device_2                     ;пристрій на обслуговуванні
290  terminate
400  generate 300
410  seize p_device_1                     ;транзакт завантажує пристрій
411  funavail device_1,re,ttt             ;блокування пристрою device_1
413  funavail pered_vidmova_1,re,ttt      ;блокування пристрою pered_vidmova_1
420  advance 16                           ;затримка черги на 16 одиниць м.ч. на час
                                          проведення ТО
421  favail device_1                      ;звільнення пристрою device_1
423  favail pered_vidmova_1               ;звільнення пристрою pered_vidmova_1
430  release p_device_1
440  seize pered_vidmova_1
450  advance fn$FUN421
451  advance fn$FUN421
452  advance fn$FUN421
453  advance fn$FUN421
454  advance fn$FUN421
455  advance fn$FUN421
460  release pered_vidmova_1
480  seize o_device_1
481  funavail device_1,re,ttt
490  advance fn$FUN49
491  advance fn$FUN49
492  advance fn$FUN49
493  advance fn$FUN49
494  favail device_1                      ;звільнення пристрою device_1
500  release o_device_1
510 ttt terminate                         ;видалення транзакта
1400  generate 300                        ;генерація заявок в чергу
1410  seize p_device_2                    ; моделювання зайняття каналу
1411  funavail device_2,re,qqq            ;блокування пристрою device_2
1413  funavail pered_vidmova_2,re,qqq     ;блокування пристрою pered_vidmova_2
```

```
1420  advance 16                          ;затримка черги на 16 одиниць м.ч. на час
                                          проведення ТО
1421  favail device_2                     ;звільнення пристрою device_2
1423  favail pered_vidmova_2              ;звільнення пристрою pered_vidmova_2
1430  release p_device_2
1440  seize pered_vidmova_2               ;моделювання зайняття каналу pered_vidmova_2
1450  advance fn$FUN505
1451  advance fn$FUN505
1452  advance fn$FUN505
1453  advance fn$FUN505
1454  advance fn$FUN505
1455  advance fn$FUN505
1460  release pered_vidmova_2             ;звільнення від завантаження pered_vidmova_2
1480  seize o_device_2                    ;моделювання зайняття каналу o_device_2
1481  funavail device_2,re,qqq
1490  advance fn$FUN57
1491  advance fn$FUN57
1492  advance fn$FUN57
1493  advance fn$FUN57
1494  favail device_2                     ;звільнення пристрою o_device_2
1500  release o_device_2                  ;звільнення від завантаження o_device_2
1510 qqq terminate
2000  generate 65000
2001  terminate 1
start 1                                   ;видача статистики, припинення моделювання
```

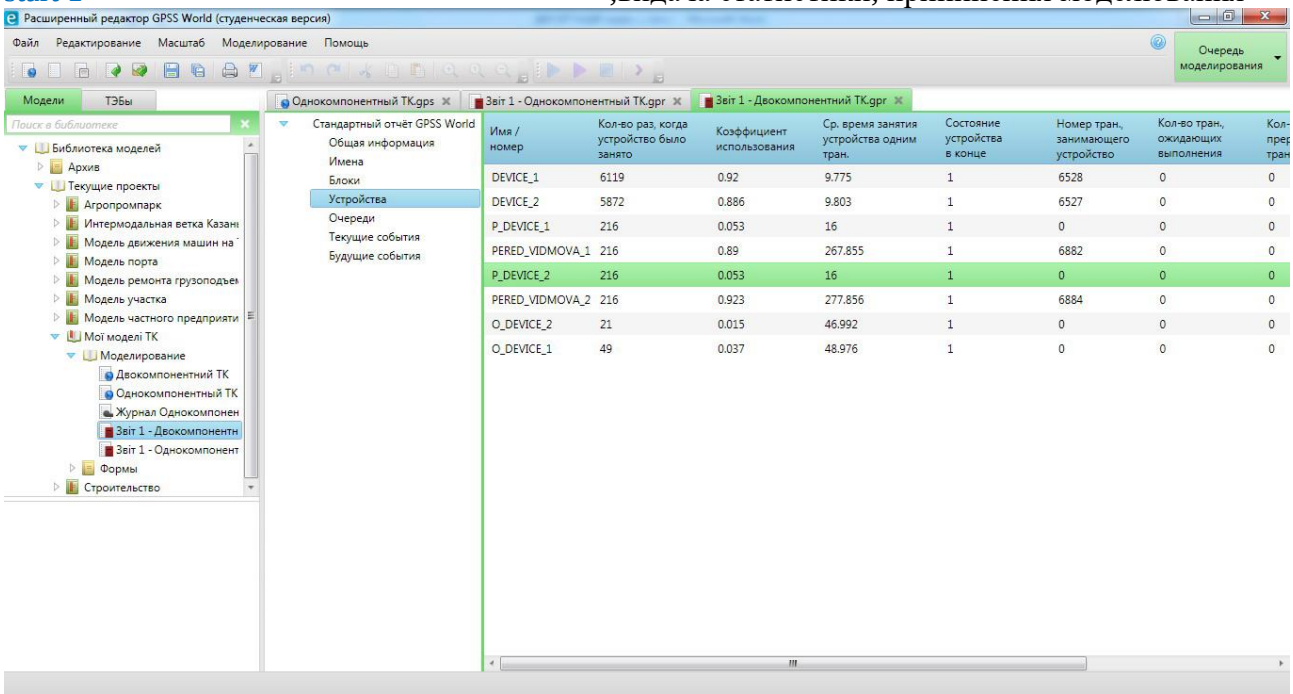


Рис. В.2. Скріншот розрахунку двокомпонентної моделі

Загальна інформація

Час початку	Кінцевий час	Кількість блоків	Кількість пристроїв	Кількість багатоканальних пристроїв
0	65000	62	8	0

Імена

Ім’я	Значення
CHERGA_1	10004.000
DEVICE_1	10005.000
DEVICE_2	10006.000
FUN421	10000.000
FUN49	10002.000
FUN505	10001.000
FUN57	10003.000
O_DEVICE_1	10012.000
O_DEVICE_2	10011.000
PERED_VIDMOVA_1	10008.000
PERED_VIDMOVA_2	10010.000
P_DEVICE_1	10007.000
P_DEVICE_2	10009.000
QQQ	60.000
TTT	35.000

Блоки

Мітка	Поз. блоку	Тип блоку	Кільк. транзактів у блоці	Кільк. транзактів у кінці моделювання	Кільк. транзактів очікуючих
	1	GENERATE	6499	0	0
	2	QUEUE	6499	380	0
	3	SEIZE	6119	0	0
	4	DEPART	6119	0	0
	5	ADVANCE	6119	1	0
	6	RELEASE	5872	0	0
	7	SEIZE	5872	0	0
	8	ADVANCE	5872	1	0
	9	RELEASE	5666	0	0
	10	TERMINATE	5666	0	0
	11	GENERATE	216	0	0
	12	SEIZE	216	0	0
	13	FUNAVAIL	216	0	0
	14	FUNAVAIL	216	0	0
	15	ADVANCE	216	0	0
	16	FAVAIL	216	0	0
	17	FAVAIL	216	0	0
	18	RELEASE	216	0	0
	19	SEIZE	216	0	0
	20	ADVANCE	216	0	0
	21	ADVANCE	210	0	0
	22	ADVANCE	198	0	0
	23	ADVANCE	157	0	0
	24	ADVANCE	119	1	0
	25	ADVANCE	76	0	0
	26	RELEASE	49	0	0
	27	SEIZE	49	0	0
	28	FUNAVAIL	49	0	0
	29	ADVANCE	49	0	0
	30	ADVANCE	49	0	0
	31	ADVANCE	49	0	0

	32	ADVANCE	49	0	0
	33	FAVAIL	49	0	0
	34	RELEASE	49	0	0
TTT	35	TERMINATE	461	0	0
	36	GENERATE	216	0	0
	37	SEIZE	216	0	0
	38	FUNAVAIL	216	0	0
	39	FUNAVAIL	216	0	0
	40	ADVANCE	216	0	0
	41	FAVAIL	216	0	0
	42	FAVAIL	216	0	0
	43	RELEASE	216	0	0
	44	SEIZE	216	0	0
	45	ADVANCE	216	0	0
	46	ADVANCE	206	0	0
	47	ADVANCE	176	0	0
	48	ADVANCE	135	0	0
	49	ADVANCE	92	1	0
	50	ADVANCE	47	0	0
	51	RELEASE	21	0	0
	52	SEIZE	21	0	0
	53	FUNAVAIL	21	0	0
	54	ADVANCE	21	0	0
	55	ADVANCE	21	0	0
	56	ADVANCE	21	0	0
	57	ADVANCE	21	0	0
	58	FAVAIL	21	0	0
	59	RELEASE	21	0	0
QQQ	60	TERMINATE	420	0	0
	61	GENERATE	1	0	0
	62	TERMINATE	1	0	0

Пристрої

Ім’я	Кільк. раз зайнято	Коеф. викор.	Сер.час одним транзактом	Стан пристар. в кінці	Номер транзакта, що займає пристрій	Кільк. транз. Що очікують	Кільк. транзактів очікують
DEVICE_1	6119	0.920	9.775	1	6528	0	380
DEVICE_2	5872	0.886	9.803	1	6527	0	0
P_DEVICE_1	216	0.053	16.000	1	0	0	0
PERED_VIDMOVA_1	216	0.890	267.855	1	6882	0	0
P_DEVICE_2	216	0.053	16.000	1	0	0	0
PERED_VIDMOVA_2	216	0.923	277.856	1	6884	0	0
O_DEVICE_2	21	0.015	46.992	1	0	0	0
O_DEVICE_1	49	0.037	48.976	1	0	0	0

Черги

Ім’я	MAX черги	Поточна черга	Кількість входжень	Кільк. входжень в чергу	Середнє значення черги	Середній час одного	Середній час перебув транз в черзі

CHERGA_1	381	380	6499	29	174.367	1743.942	1751.759

Поточні події

Номер транзакта	Пріоритет транзакта	Час входу транзакта	Номер сімейства транзакта	Номер блоку в якому був транзакт	Номер наступного блоку
6935	0	65000	6935	0	1

Майбутні події

Номер транзакта	Пріоритет транзакта	Час входу транзакта	Номер сімейства транзакта	Номер блоку в якому був транзакт	Номер наступного блоку
6528	0	65006.000	6528	5	6
6527	0	65006.000	6527	8	9
6882	0	65039.286	6882	24	25
6914	0	65100.000	6914	0	11
6915	0	65100.000	6915	0	36
6884	0	65179.546	6884	49	50
6936	0	130000.000	6936	0	61

ДОДАТОК Г

Лемма. Система рівнянь (3.9) має наступне рішення:

$$\rho_{1112}(x_2x_3) = \rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(t)v_{f_2}(t,x_2)f_3(x_3+t)dt,$$

$$\rho_{2112}(x_1x_3) = \rho_0\int_0^\infty h_{f_2}(t)v_{f_1}(t,x_1)f_3(x_3+t)dt, \qquad \text{(В 1)}$$

де $h_{f_i}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_i^{*(n)}(t)$ – щільність функції відновлення, породженої *fi*; $v_{f_i}(t,x) = f_i(t+x) + \int_o^t f_i(t+x-s)h_{f_i}(s)ds$ - щільність розподілу прямого залишкового часу для процесу відновлення. Доказ леми проводиться безпосередній підстановкою. Підставляючи (В.1) у друге рівняння (3.1) і розписуючи $v_{f_i}(t,x_i)$, отримуємо:

$$\rho_{1112}(x_2x_3) = \rho_0\int_0^\infty f_1(t)f_2(x_2+t)f_3(x_3+t)dt +$$

$$\rho_0\int_0^\infty f_1(t)dt\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+t+z)f_2(x_2+t+z)dz +$$

$$+\rho_0\int_0^\infty f_1(t)dt\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+t+z)dz\int_0^z f_2(x_2+t+z-s)h_{f_2}(s)ds +$$

$$+\rho_0\int_0^\infty f_2(x_2+t)dt\int_0^\infty h_{f_2}(z)f_3(x_3+t+z)f_1(t+z)dz +$$

$$+\rho_0\int_0^\infty f_2(x_2+t)dt\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+t+z)dz\int_0^z f_1(t+z-s)h_{f_1}(s)ds. \qquad \text{(В.2)}$$

Перетворимо другий доданок (В.2) з урахуванням заміни $t+z=z'$:

$$\rho_0\int_0^\infty f_1(t)dt\int_t^\infty h_{f_1}(z-t)f_3(x_3+z)f_2(x_2+z)dz =$$

$$\rho_0\int_0^\infty f_3(x_3+z)f_2(x_2+z)dz\int_0^z h_{f_1}(z-t)f_1(t)dt =$$

$$= \rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+z)f_2(x_2+z)dz - \rho_0\int_0^\infty f_1(z)f_3(x_3+z)f_2(x_2+z)dz.$$

Складаючи отриманий результат з перших складових (В.2), маємо:

$$\rho_0 \int_0^\infty h_{f_1}(z) f_3(x_3+z) f_2(x_2+z)dz \quad . \qquad (B.3)$$

Перетворимо четверте доданок (B.2) з урахуванням заміни $t+z=z'$:

$$\rho_0 \int_0^\infty f_2(x_2+t)dt \int_t^\infty h_{f_2}(z-t) f_3(x_3+z) f_1(z)dz = \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z) f_1(z)dz \int_0^z h_{f_2}(z-t) f_2(x_2+t)dt =$$

$$= [z-t=t'] = \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z) f_1(z)dz \int_0^z f_2(x_2+z-t) h_{f_2}(t)dt \,. \qquad (B.4)$$

Перетворимо третій доданок (B.2) з урахуванням заміни $t+z=z'$:

$$\rho_0 \int_0^\infty f_1(t)dt \int_t^\infty h_{f_1}(z-t) f_3(x_3+z)dz \int_0^{z-t} f_2(x_2+z-s) h_{f_2}(s)ds =$$

$$= \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z)dz \int_0^z h_{f_1}(z-t) f_1(t)dt \int_0^{z-t} f_2(x_2+z-s) h_{f_2}(s)ds \quad . \qquad (B.5)$$

Перетворимо п'ятий доданок (B.2) з урахуванням заміни $t+z=z'$:

$$\rho_0 \int_0^\infty f_2(x_2+t)dt \int_t^\infty h_{f_2}(z-t) f_3(x_3+z)dz \int_0^{z-t} f_1(z-s) h_{f_1}(s)ds =$$

$$= \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z)dz \int_0^z h_{f_2}(z-t) f_2(x_2+t)dt \int_0^{z-t} f_1(z-s) h_{f_1}(s)ds =$$

$$= \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z)dz \int_0^z f_1(z-s) h_{f_1}(s)ds \int_0^{z-s} h_{f_2}(z-t) f_2(x_2+t)dt = [z-s=t] =$$

$$= \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z)dz \int_0^z f_1(t) h_{f_1}(z-t)dt \int_{z-t}^z h_{f_2}(s) f_2(x_2+z-s)dt \quad . \qquad (B.6)$$

Складаючи (B.5) і (B.6), отримуємо:

$$\rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z)dz \int_0^z h_{f_1}(z-t) f_1(t)dt \int_0^t f_2(x_2+z-s) h_{f_2}(s)ds \quad . \qquad (B.7)$$

Перетворюючи (B.7) і складаючи з (B.4), отримуємо:

$$\rho_0 \int_0^\infty h_{f_1}(z) f_3(x_3+z)dz \int_0^z f_2(x_2+z-t) h_{f_2}(t)dt - \rho_0 \int_0^\infty f_3(x_3+z) f_1(z)dz \int_0^z f_2(x_2+z-t) h_{f_2}(t)dt +$$

$$+\rho_0\int_0^\infty f_3(x_3+z)f_1(z)dz\int_0^z f_2(x_2+z-t)h_{f_2}(t)dt=$$

$$\rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+z)dz\int_0^z f_2(x_2+z-t)h_{f_2}(t)dt\,.$$

Складаючи останній вираз з (В.3), маємо

$$\rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+z)f_2(x_2+z)dz+\rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(z)f_3(x_3+z)dz\int_0^z f_2(x_2+z-t)h_{f_2}(t)dt=$$

$$=\rho_0\int_0^\infty h_{f_1}(t)v_{f_2}(t,x_2)f_3(x_3+t)dt\,,$$

що є першим рівнянням системи з (В.1). Отже, лема доведена.

ДОДАТОК Д

Рішення в пакеті MathCad 15 для визначення оптимальної періодичності календарного ТО для вихідних даних №2 із табл.3.9.

p Періодичність профілактичних дій;

$k := 4$ Порядок закону Ерланга;

$M1 := 56$ Математичне очікування часу безвідмовної роботи(ЧБР);

$l1 := \frac{k}{M1}$ Інтенсивність для М1;

$M2 := 30$ Математичне очікування часу відновлення(ЧВ);

$b1 := \frac{k}{M2}$ Інтенсивність для М2;

$M3 := 5$ Тривалість профілактики;

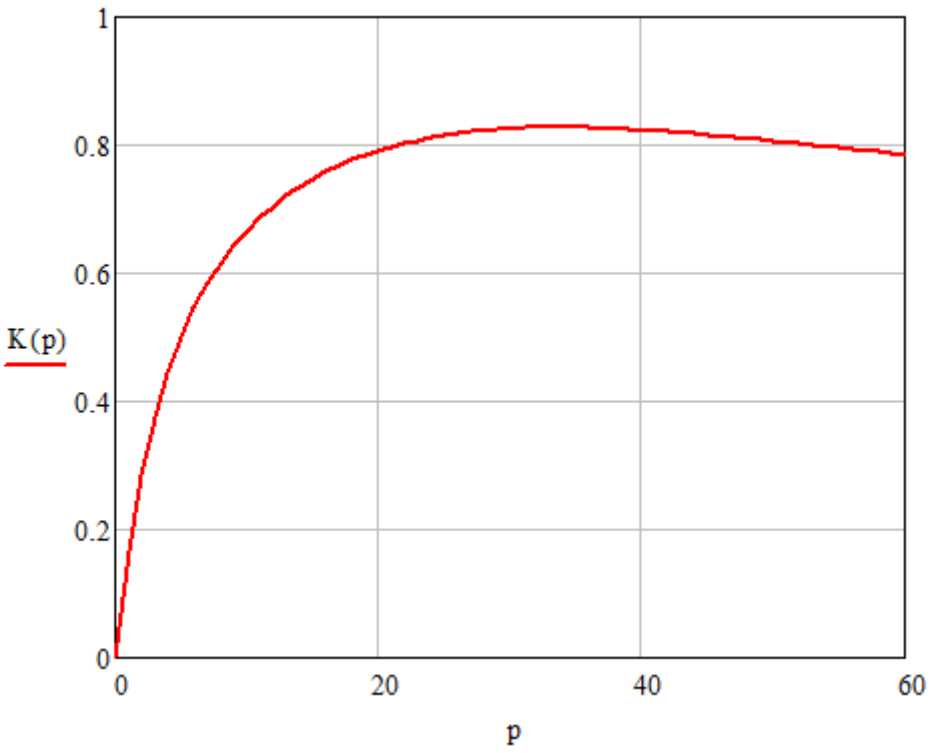
$i := \sqrt{-1}$ $c := \cos\left(2\cdot\frac{\pi}{k}\right) + i\cdot\sin\left(2\cdot\frac{\pi}{k}\right)$

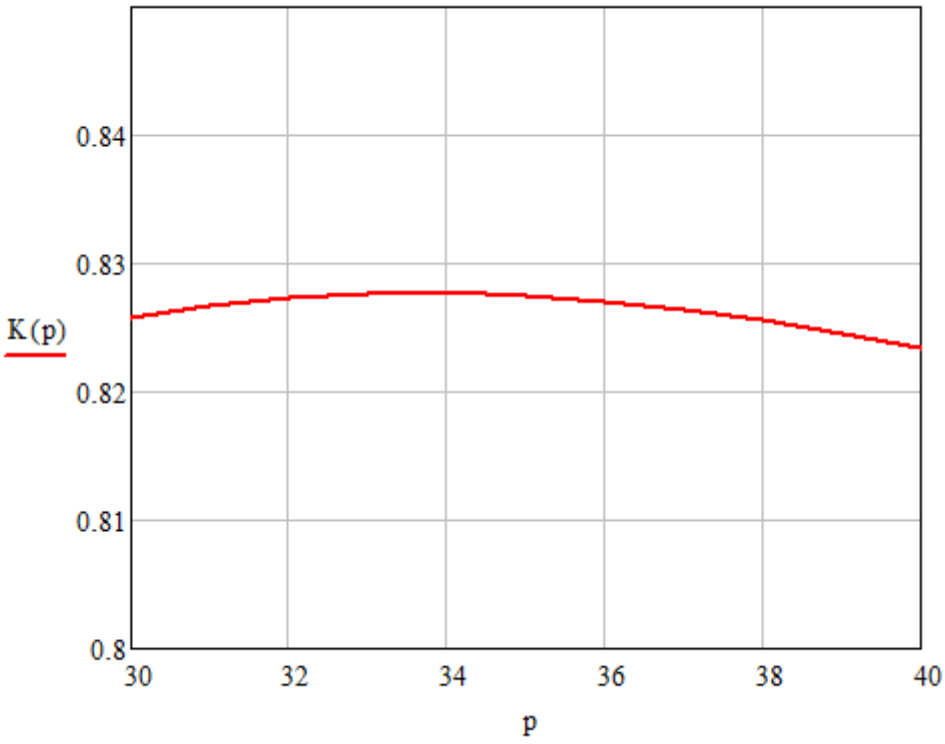
$H(t) := \frac{1}{k}\cdot\left[l1\cdot t + \sum_{j=1}^{k-1}\left[\frac{c^j}{1-c^j}\cdot\left[1 - e^{-l1\,t\cdot\left(1-c^j\right)}\right]\right]\right]$ Функція відновлення для М1;

$G1(t) := 1 - e^{-b1\cdot t}\cdot\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(b1\cdot t)^i}{i!}$ Функція розподілу для М1; $G10(t) := 1 - G1(t)$

$K(p) := \frac{p}{p + M3 + \int_0^p H(t)\cdot G10(p-t)\,dt}$ Коефіцієнт готовності;

$p := 0, 1 .. 60$





Деталізований (масштабований) коефіцієнт готовності

p Періодичність профілактичних дій;

M1 := 4 80 Середнє напрацювання часу безвідмовної роботи (ЧБР1) для К1;

Рішення в пакеті MathCad 15 для визначення оптимальної періодичності ТО для вихідних даних №12 із табл. 3.5.

$p := 0, 1 .. 40$

$l1 := \frac{k}{M1}$ Інтенсивність для М1;

$M2 := 66$ Математичне очікування часу безвідмовної роботи(ЧВР2) для К2;

$l2 := \frac{k}{M2}$ Інтенсивність для М2;

$M3 := 6$ Математичне очікування часу відновлення ЧВ1 компоненти 1 (К1);

$b1 := \frac{k}{M3}$ Інтенсивність для М3;

$M4 := 4$ Математичне очікування часу відновлення ЧВ2 компоненти 2 (К2);

$b2 := \frac{k}{M4}$ Інтенсивність для М4;

$M5 := 2$ Тривалість профілактики;

$$S(p) := \frac{c0 \cdot p - cp \cdot M5 - ca1 \cdot \int_0^p H1(t) \cdot G10(p-t)\,dt - ca2 \cdot \int_0^p H2(t) \cdot G20(p-t)\,dt}{p + \left(M5 + \int_0^p H1(t) \cdot G10(p-t)\,dt + \int_0^p H2(t) \cdot G20(p-t)\,dt\right)}$$

$i := \sqrt{-1}$ $\qquad c := \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{k}\right) + i \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{k}\right)$

$$H1(t) := \frac{1}{k} \cdot \left[l1 \cdot t + \sum_{j=1}^{k-1} \left[\frac{c^j}{1 - c^j} \cdot \left[1 - e^{-l1 \cdot t \cdot \left(1 - c^j\right)} \right] \right] \right]$$ Функція відновлення для М1;

$$H2(t) := \frac{1}{k} \cdot \left[l2 \cdot t + \sum_{j=1}^{k-1} \left[\frac{c^j}{1 - c^j} \cdot \left[1 - e^{-l2 \cdot t \cdot \left(1 - c^j\right)} \right] \right] \right]$$ Функція відновлення для М2;

$$G1(t) := 1 - e^{-b1 \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(b1 \cdot t)^i}{i!}$$ Функція розподілу М3; $\qquad G10(t) := 1 - G1(t)$

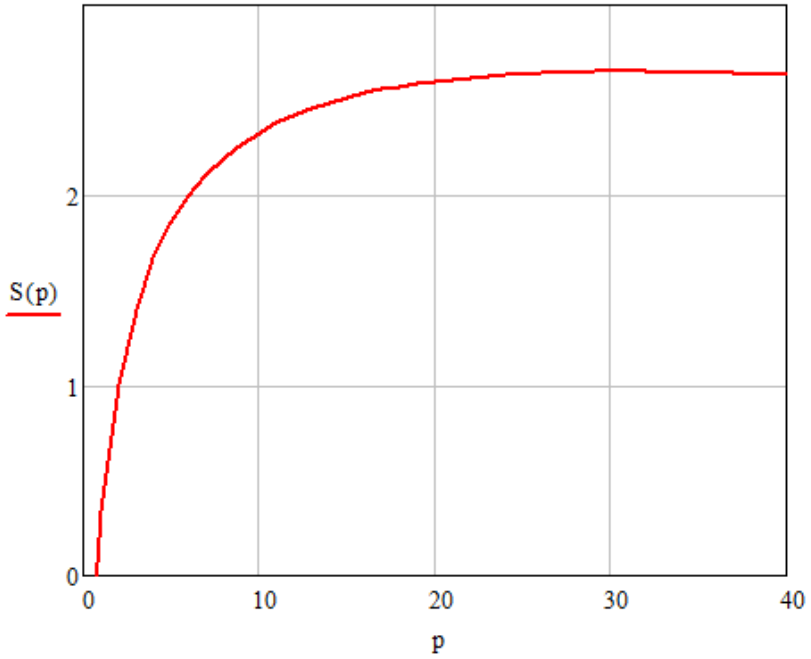
$$G2(t) := 1 - e^{-b2 \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(b2 \cdot t)^i}{i!}$$ Функція розподілу М4; $\qquad G20(t) := 1 - G2(t)$

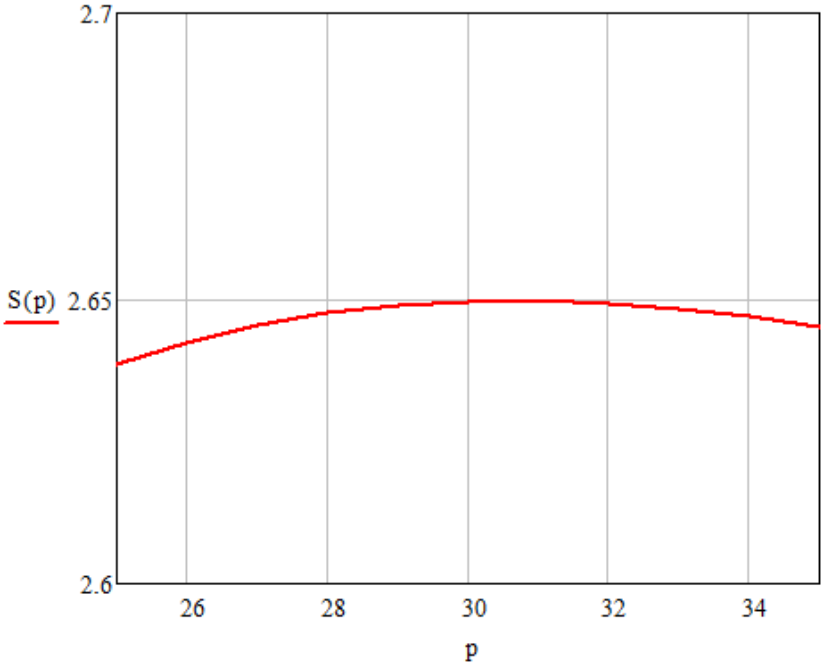
$c0 := 3$ Прибуток за одиницю часу справного функціонування системи;

$ca1 := 3$ Затрати на одиницю часу відновлення компоненти К1;

$ca2 := 2$ Затрати на одиницю часу відновлення компоненти К2;

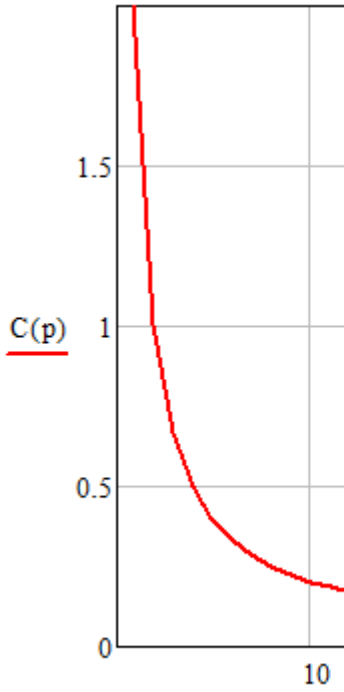
$cp := 1$ Затрати на одиницю часу профілактики.

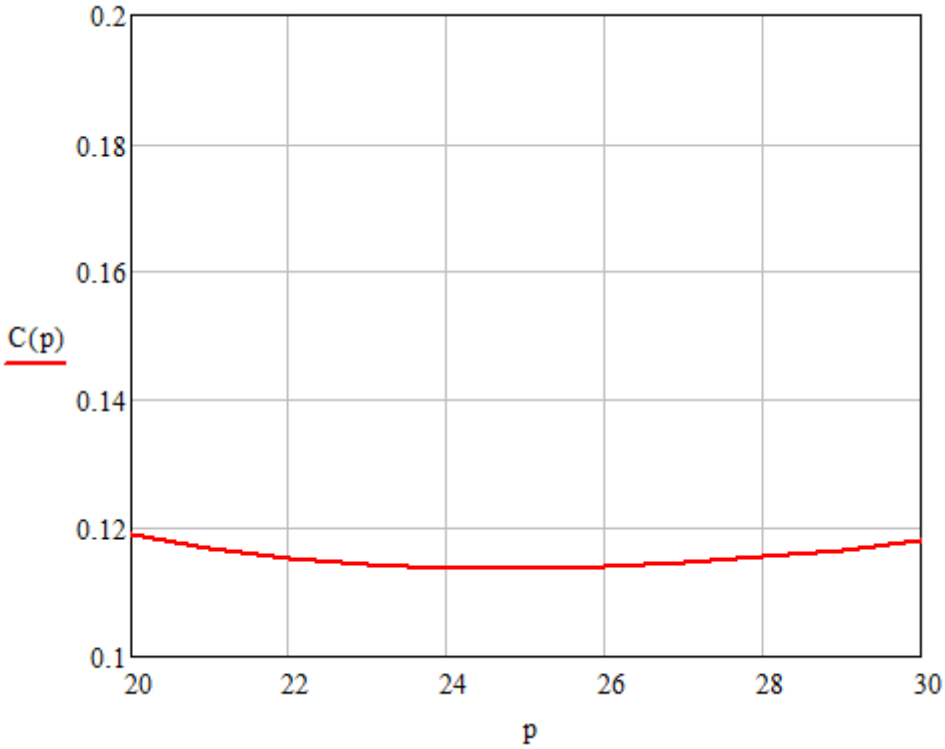




Деталізований (масштабований) середній прибуток

$$C(p) := \frac{cp \cdot M5 + \int_0^p H1(t) \cdot G10(p-t)\,dt \cdot ca1 + ca2 \cdot \int_0^p H2(t) \cdot G20(p-t)\,dt}{p}$$





Деталізовані (масштабовані) середні затрати

Наукове видання

ТІТОВА Людмила Леонідівна
НАДТОЧІЙ Олександр Васильович
РОГОВСЬКИЙ Іван Леонідович

МЕТОДОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ

Монографія

Підписано до друку 29.11.2019. Формат 60×84/16.
Ум. др. арк. 20,4. Обл.-вид. арк. 28,8.
Наклад 100 прим. Зам. № 11123

Видавець і виготовлювач Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041.
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи
ДК № 4097 від 17.06.2011