

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Вібродіагностика шпindelної групи верстата з
використанням імовірнісних ланцюгів Байєса**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Мирошніченко Максим Олександрович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Зубовецька Наталія Тарасівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2023 року

Луцький національний технічний університет

Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (магістерський) рівень
освітньо-професійної програми «Прикладна механіка»
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Р. РЕДЬКО

“ _____ ” _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
 НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Мирошниченко Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Вібродіагностика шпindelної групи верстата з використанням імовірнісних ланцюгів Байєса», керівник кваліфікаційної роботи магістра Зубовецька Наталія Тарасівна к.т.н., доц. каф. ПМіМ затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» січня 2023 р., № 42/01-02

2. Строк подання студентом роботи 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація по токарно-револьверних верстатах, конструкторська документація, нормативні дані.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Основні задачі і засоби і стан технічної діагностики металорізальних верстатів
2. Технічна діагностика верстатів з використанням імовірнісних ланцюгів байєса. 3. Розробка системи технічної діагностики верстату з використанням байєсових мереж.
 4. Вібродіагностика шпindelної групи верстата мод.16м05а. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Структура технічної діагностики- 1 ф. А1. 2. Баєсові мережі- 1ф. А1. 3. Структура системи технічної діагностики верстату – 1ф. А1. 4. Об'єкт діагностики- 1 ф. А1. 5. Запис кривої биття - 1 ф. А1. 6. Частотний аналіз биття шпинделя – 2ф. А1. 7. Схема зв'язків - 1ф. А1. 8. Навчання мережі Байєса -1ф.А1. 9. Діагностування шпindelної групи - 2 ф_А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

01.03.2023 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Загальний розділ. Проблеми автоматизації ГСП</i>	<i>20.09.2023р.</i>	
2.	<i>Розробка методичного і програмного забезпечення розрахунку ГСП</i>	<i>6.10.2023р.</i>	
3.	<i>Програмне і методичне забезпечення</i>	<i>11.11.2023р.</i>	
4.	<i>Практична апробація розроблених методик</i>	<i>16.11.2023р.</i>	
5.	<i>Представлення роботи</i>	<i>01.12.2023р.</i>	
6.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>		

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Мирошніченко М.О.

(прізвище та ініціали)

Зубовецька Н.Т.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мирошниченко М.О. Вібродіагностика шпиндельної групи верстата з використанням імовірнісних ланцюгів Байєса. Рукопис.

Атестаційна магістерська робота на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2023.

Робота присвячена питанням розробки методу вібродіагностики вузлів верстатів з використанням системи штучного інтелекту на базі ймовірнісних мереж Байєса. Шляхом комп'ютерного діагностування підвищено техніко-економічні показники і розширено працездатність верстатів.

Ключові слова: верстат, технічна діагностика, мережі Байєса, шпиндельний вузол

ABSTRACT

Myroshnychenko M.O. Vibration diagnostics of the spindle group of the machine tool using probabilistic Bayesian chains - Manuscript.

Attestation master's work for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 - Applied mechanics. - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2023.

The work is devoted to issues of developing a method of vibration diagnostics of machine tool assemblies using an artificial intelligence system based on Bayesian probabilistic networks. By means of computer diagnostics, the technical and economic indicators were increased and the working capacity of the machines was expanded.

Key words: machine tool, technical diagnostics, Bayes networks, spindle node

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСНОВНІ ЗАДАЧІ І ЗАСОБИ І СТАН ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ	11
1.1 Основні напрями, цілі і задачі технічної діагностики верстатів .	11
1.2 Основні типи і особливості технічної діагностики металорізальних верстатів	14
1.3 Вибір переважних контрольованих параметрів для діагностики верстатної системи	16
1.4 Автоматизований контроль і діагностика інструменту в процесі механообробки. Завдання автоматизованого контролю і діагностики інструменту	17
1.5 Моніторинг і діагностика вібрацій верстатів	18
1.6 Висновки і постановка задач дослідження	22
2 ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ВЕРСТАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМОВІРНІСНИХ ЛАНЦЮГІВ БАЙЄСА.....	24
2.1 Задача діагностики верстата як слабкоструктурована проблема системного аналізу	24
2.2. Підходи щодо розв’язання слабкоструктурованих задач	27
2.3 Графічне та математичне представлення мереж Байєса	29
2.3.1 Графова структура мереж Байєса	29
2.3.2 Типи байєсових мереж	33
2.4 Побудова мереж Байєса з прихованими вершинами за навчальними даними	37
2.5 Методика знаходження параметрів байєсових мереж з прихованими вершинами	40
2.6 Висновки до розділу.....	42
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВЕРСТАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЄСОВИХ МЕРЕЖ	43
3.1 Структура системи технічної діагностики верстату	43

3.2	Програмна реалізація системи технічної діагностики верстату ...	46
3.3	Побудова мережі Байєса	47
3.3.1	Побудова мережі по завантаженим даним	47
3.3.2	Побудова мережі в «ручному» режимі	49
3.3.3	Ймовірнісний вивід	52
3.3.4	Формування вибірки по заданій мережі	53
3.3.5	Порівняння мереж за структурою	54
3.3.6	Знаходження параметрів мереж Байєса з прихованими змінними	55
3.4	Висновки по розділу	55
4 ВІБРОДІАГНОСТИКА ШПИНДЕЛЬНОЇ ГРУПИ		
	ВЕРСТАТА МОД.16М05А	57
4.1	Опис об'єкту діагностування	57
4.1.1	Основні технічні характеристики	57
4.1.2	Показники надійності	59
4.1.3	Привід головного руху	59
4.1.4.	Бабка передня	61
4.1.5.	Шпиндельний вузол	62
4.2	Розробка моделі діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні	63
4.2.1	Встановлення зв'язків погрішностей форми з параметрами шпиндельної групи	63
4.2.2	Встановлення діагностичних ознак погрішностей форми	64
4.3	Частотний аналіз биття шпинделів і встановлення діагностичних ознак	65
4.3.1	Методика аналізу	65
4.3.2	Фур'є – аналіз кривої биття	68
4.3.3	Встановлення зв'язків по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками	72
4.4	Навчання мережі Байєса для діагностики шпиндельної групи	73

4.4.1	Побудова матриці навчання мережі	74
4.4.2	Побудова й аналіз мережі для діагностування шпиндельної групи верстата	77
4.4.3.	Діагностика дефектів шпиндельної групи з використанням розробленої мережі Байсса	78
4.5	Висновки по розділу	85
	ВИСНОВКИ.....	86
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88
	ДОДАТКИ	90

ВСТУП

Актуальність теми. Технічна діагностика — це науково-технічна сфера, яка вивчає і визначає ознаки дефектів технічних об'єктів, а також методи і засоби виявлення та пошуку дефектів. Основним предметом технічної діагностики є організація ефективної перевірки справності, працездатності, правильності функціонування технічних об'єктів (деталей, елементів, вузлів, блоків, заготовок, пристроїв, виробів, агрегатів, систем, а також процесів передачі, обробки і зберігання матеріалів, енергії та інформації), а також процесів діагностування технічного стану об'єктів під час їх виготовлення та Діагностика є однією з найважливіших процедур підтримки та забезпечення надійності технічних об'єктів.

Діагностика здійснюється або за допомогою апаратури, або за допомогою людиною (наприклад, зовнішній огляд, «на слух»). Систему діагностування складають об'єкт і засоби його діагностування. Об'єкт і засоби виконують певні алгоритми діагностування, працюючи разом. Результатом є технічний діагноз, наприклад «інструмент справний», «верстат непрацездатний». Тестові та функціональні системи відрізняються. Системи першого вигляду використовують під час виготовлення об'єкту, під час його ремонту та профілактики, під час зберігання, а також перед застосуванням і після нього, коли необхідно перевірити його працездатність і справність. Тоді об'єкт діагностування отримує спеціально підготовлені тестові процедури. Коли об'єкт використовується за призначенням, використовують системи другого вигляду для перевірки правильності функціонування та пошуку дефектів, які порушують функціонування. Отже, на об'єкт можуть впливати тільки дії, передбачені його алгоритмом функціонування. Розробка і створення систем діагностування включає вивчення об'єкта, виявлення можливих дефектів і його ознак; створення математичних моделей (формалізованого опису) справного об'єкта (працюючого) і того ж об'єкта в несправних станах; розробка алгоритмів діагностування; налагодження та випробування систем.

У вивченні об'єктів дуже важливо класифікувати їх за різними ознаками, наприклад за характером зміни значень параметрів, споживаною енергією тощо. Вивчення дефектів проводиться з метою визначення їх походження, причин і ймовірності їх виникнення, фізичних умов їх прояву, умов виявлення тощо.

Математична модель об'єкту діагностування (детермінована або імовірнісна) — це модель, яка описує об'єкт. Моделі, які використовуються при діагностуванні, навіть для справних об'єктів, можуть відрізнятися від моделей, які використовуються при проектуванні тих самих об'єктів. Наприклад, криві шуму або вібрації можуть використовуватися для моделювання технічного стану шумних об'єктів (за акустичних методів).

Алгоритм діагностування передбачає виконання певного набору умовних або безумовних експериментів з об'єктом. Експеримент визначається тестом або робочою дією та набором контрольованих ознак, які визначають реакцію об'єкту на цю дію. Алгоритми перевірки та пошуку є різними. Алгоритми перевірки — знаходження дефектів, які порушують роботу, працездатність або правильність функціонування пристрою. За допомогою алгоритму пошуку, можна визначити, який саме дефект є в об'єкті (з числа тих, що розглядаються).

Алгоритми діагностування підтримуються засобами діагностування, які виробляють і подають тестові дії на об'єкт, зберігають можливі реакції об'єкту на дії, «читають» реальні реакції об'єкту і порівнюють реальні та можливі реакції, щоб поставити діагноз. Їх можна розділити на програмні, апаратні та програмно-апаратні. Останні два види використовуються для діагностики технічного стану електронних пристроїв, які працюють за змінною програмою. Апарати можуть бути вбудованими або зовнішніми (по відношенню до об'єкту). Перші використовуються в системах тестування, тоді як другі використовуються для функціонального діагностування. Зовнішні апарати можуть бути універсальними або спеціалізованими, автоматичними, автоматизованими або ручними.

Технічна діагностика і медична діагностика мають багато спільного. Технічна прогностика та технічна генетика тісно пов'язані з технічною діагностикою, яка визначає поточний технічний стан об'єкта. Останні визначають майбутні та минулі технічні стани на основі ймовірних змін і передісторії

реального технічного стану.

Розвиток обчислювальної техніки дозволив створити програмні комплекси цифрового діагностування динамічних систем, які значно перевершують аналогові системи. Тим не менш, для діагностування систем верстатів потрібні деякі зміни в методах підготовки та розрахунків.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблема автоматизації моделювання при діагностуванні систем поки що недостатньо вирішена, і що необхідно вирішити цю наукову задачу.

Мета роботи – розробка методу вібродіагностики вузлів верстатів з використанням системи штучного інтелекту на базі ймовірнісних мереж Байєса.

Щоб досягнути поставленої цілі, були сформульовані та вирішені наступні завдання:

1. Розробити математичні моделі для діагностики металорізального верстату, який належить до шпиндельної групи.
2. Розробити схеми діагностування та об'єктні програми
3. Створити програми для підготовки даних і аналізу результатів діагностування.
4. Розробити загальну структуру програмних засобів діагностування верстату.
5. Провести тестування розробленого програмного забезпечення.

Об'єкт дослідження – механічні ланцюги вузлів верстатів.

Предмет дослідження – вібраційні процеси в механічних ланцюгах і їхній вплив на діагностичні ознаки працездатності окремих вузлів верстата.

Методи дослідження: теорія динаміки верстатів, методи планування та проведення експериментальних досліджень, теорія коливань, диференціальне і інтегральне числення, дискретна математика, теорія ймовірності.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропонований алгоритм ЕМ для навчання БМ з прихованими вершинами. Унікальна архітектура та впроваджена комп'ютерна система підтримки прийняття рішень для аналізу даних з використанням байєсових мереж, особливо для прихованих вершин.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені нові програмні

модулі для діагностування шпиндельної групи токарного верстату мод. 16M05A.

У результаті досліджень отримані наступні результати:

- математичні моделі діагностики технологічної системи металорізального верстату;

- об'єктні програми і схеми діагностування в програмному середовищі;

- програми для підготовки даних і аналізу результатів діагностування;

- загальна структура програмних засобів діагностування верстату.

Особистий внесок магістранта полягає в тому, що ним впроваджена комп'ютерна система підтримки прийняття рішень для проведення аналізу даних з використанням баєсових мереж, що дозволяє підвищити техніко-економічні показники і розширити ремонтоздатності верстатів.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень були представлені на наукових семінарах кафедри прикладної механіки та мехатроніки Луцького НТУ та на III студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» (Луцьк - 16 листопада 2023 року).

1 ОСНОВНІ ЗАДАЧІ І ЗАСОБИ І СТАН ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

В даний час багато підприємств користуються послугами організацій, що діагностують промислове верстатне устаткування. Діагностика дозволяє оцінити загальний стан і працездатність устаткування, а також визначити причину несправності техніки. Також перевірка направлена на виявлення причин і несправностей тих елементів, які вплинули на зміну технічних параметрів верстата. Для цих цілей широко використовують сучасні методи технічної діагностики.

1.1 Основні напрями, цілі і задачі технічної діагностики верстатів

Термін «діагностика» походить від грецького слова «діагнозис», яке перекладається як «розпізнавання» або «визначення» [4].

В процесі діагностики встановлюється діагноз, який може бути медичним (діагностика хворого) або технічним (діагностика системи). Технічна діагностика (ТД) — це область, яка вивчає стан технічної системи.

Технічна діагностика вивчає діагностичні моделі, алгоритми ухвалення рішень і методи отримання та оцінки інформації. Її мета - підвищити надійність і ресурс технічних систем (ТС).

Найважливішим показником надійності є відсутність відмов у роботі технічної системи. Здатність металорізальних верстатів (МРВ) зберігати продуктивність і точність обробки.

Технічна діагностика верстатів (ТДВ) підвищує надійність і ефективність експлуатації, дозволяючи швидко виявити дефекти та несправності під час процесу технічного обслуговування. Це також дозволяє експлуатувати МРВ відповідно до їх стану.

У практиці ресурс таких систем визначається по найбільш «слабких» екземплярах виробів. При експлуатації по стану кожен екземпляр експлуатується

до граничного стану відповідно до рекомендацій системи технічної діагностики. Експлуатація по технічному стану може принести вигоду, еквівалентну вартості 30% загального парку машин.

Технічна діагностика вирішує широкий спектр проблем, багато з яких пов'язані з іншими науковими галузями. Розпізнавання стану технічної системи в умовах обмеженої інформації є основним завданням технічної діагностики. Технічну діагностику також називають «нерозбірливою діагностикою», що означає, що вона проводиться без розбирання виробу. Під час експлуатації проводиться діагностування, коли дані отримати складно. Дуже часто не можна зробити однозначних висновків із наявної інформації, тому доводиться користуватися статистичними методами.

Загальна теорія розпізнавання зразків має бути теоретичним фундаментом для вирішення основного завдання технічної діагностики. Це теорія, яка є важливою частиною технічної кібернетики, охоплює розпізнавання образів будь якого походження (звукових, геометричних і т.д.), машинного розпізнавання мови, друкарського та рукописного текстів і так далі. Технічна діагностика вивчає алгоритми розпізнавання для завдань класифікації.

Діагностичні моделі є основою для алгоритмів розпізнавання технічної діагностики, які встановлюють зв'язки між поляганнями технічної системи та її відображеннями у просторі діагностичних сигналів. Правила ухвалення рішень, або вирішальні правила, є важливою частиною проблеми розпізнавання.

Рішення діагностичної задачі (віднесення виробу до справних або несправних) завжди пов'язане з ризиком помилкової тривоги або пропуску мети. Для ухвалення обґрунтованого рішення доцільно привертати методи теорії статистичних рішень, розроблені вперше в радіолокації.

Розв'язок завдань технічної діагностики поєднується з прогнозуванням надійності на найближчий період експлуатації. У цьому випадку рішення повинні ґрунтуватися на моделях відмов, вивчених у теорії надійності.

Теорія контролеспроможності є другим важливим розділом технічної діагностики. Властивість виробу забезпечувати достовірну оцінку технічного стану та швидке виявлення несправностей і відмов називається

контролеспроможністю. Конструкція виробу та система ТД визначають його контролеспроможність.

Вивчення методів і інструментів отримання діагностичної інформації є найбільшою проблемою в теорії контролеспроможності.

Складні транспортні засоби використовують автоматизований контроль стану, який включає обробку діагностичної інформації та формування управляючих сигналів. Одним із напрямків теорії контролездібності є методи проектування автоматизованих систем контролю. Отже, розробка діагностичних тестів, мінімізація процесу встановлення діагнозу та розробка алгоритмів пошуку несправностей є важливими завданнями теорії контролездібності.

У зв'язку з тим, що технічна діагностика розвивалася спочатку тільки для радіоелектронних систем, багато авторів ототожнюють теорію технічної діагностики з теорією контролеспроможності (пошуком і контролем несправностей), що, звичайно, обмежує область додатку технічної діагностики.

Структура технічної діагностики представлена на малюнку 1.1.

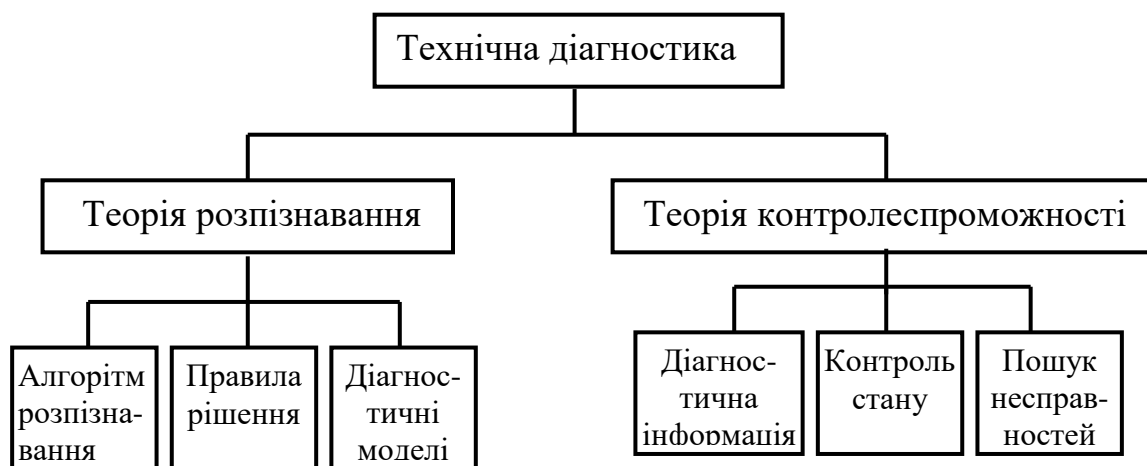


Рис. 1.1 - Структура технічної діагностики

Теорія розпізнавання та теорія контролеспроможності є двома взаємопов'язаними і взаємопов'язаними напрямками, які охоплюють її. Теорія розпізнавання містить розділи, пов'язані з побудовою алгоритмів розпізнавання, вирішальних правил і діагностичних моделей. Теорія розпізнавання охоплює діагностичні моделі, вирішальні правила та створення алгоритмів розпізнавання.

Теорія контролеспроможності включає розробку методів отримання інформації про діагностику, автоматизований контроль і пошук несправностей. Загальна теорія надійності повинна включати технічну діагностику.

1.2 Основні типи і особливості технічної діагностики металорізальних верстатів

Існує два основні напрями діагностики промислових машин [4]:

- передексплуатаційна діагностика нового устаткування;
- експлуатаційна діагностика.

Перший тип діагностики використовується для перевірки верстатів нового зразка. Він має на увазі проведення ряду комплексних випробувань, в процесі яких визначаються вади конструкції. За наслідками досліджень складається список причин, які викликали відхилення вихідних параметрів від допустимої норми, а також виявляється їх залежність від дії конкретних пристроїв і деталей устаткування.

Експлуатаційна діагностика виявляє причини порушення працездатності і появи того або іншого типу пошкоджень в різних вузлах верстата. Серед основних чинників, що впливають на якість функціонування техніки, виділяють: умови експлуатації устаткування, режими використання верстатів.

Особливості діагностики технічного стану устаткування

В процесі діагностики устаткування використовуються спеціальні засоби контролю. Особливість перевірки того або іншого верстата полягає в спрямованості вибраних методів. Діагнозом технічного стану машини є процес управління ним відповідно до певної програми.

Кожен верстат, що піддається технічній перевірці, є об'єктом діагностики. Будь-який елемент устаткування, що окремо перевіряється, також є об'єктом технічного діагностування. В більшості випадків здійснюють перевірку всіх частин верстата, особливо якщо машина має складний пристрій з великою кількістю параметрів. Для цього використовуються автоматизовані системи діагностик, в яких стан кожного показника вимірюється за допомогою спеціальних датчиків. На основі цих свідчень складають висновок про стан і

працездатність устаткування.

В даний час процес експлуатаційної діагностики організовується з мінімальними виробничими витратами для підприємства:

- перевірка в заводських умовах;
- скорочення тимчасових витрат;
- можливість безразборної діагностики;
- достовірність і надійність свідчень.

Діагностичні ознаки

В процесі діагностики складають висновок на підставі діагностичних ознак. Такими параметрами технічного стану виступають:

- параметри, що характеризують працездатність устаткування;
- різні пошкодження;
- непрямі ознаки.

Думка про особливості функціонування верстата складається на підставі роботи, наприклад шпинделя (биття), точності пересування супорта по направляючим і переміщення столу. Причинами відмови роботи устаткування можуть бути наступні пошкодження: знос підшипників шпинделя, що направляють, викривлення станини, корпусу і ходових гвинтів. Непрямими ознаками виступають показники, які пов'язані з початковими параметрами. Наприклад, віброакустичні характеристики, поява продуктів тертя рухомих частин в змащувальній рідині, теплові поля.

Об'єктом аналізу процесу механообробки в першу чергу є верстатні системи, що належать до класу великих систем, в якому підсистеми, що становлять, об'єднані енергетичними і інформаційними зв'язками із загальною метою - розмірним формоутворенням.

В процесі роботи верстатної системи під дією різних видів енергії у формоутворювальних вузлах відбуваються різні фізичні явища. Так, під дією навантажуючих сил і джерел тепла відбуваються пружні і теплові деформації деталей і вузлів верстата, і тому подібне

Кожне з цих фізичних явищ може бути оцінене своїм вектором інформативних параметрів, підметом контролю. Така оцінка є одному з основних

завдань технічної діагностики. Верстатні системи зі своїми вхідними і вихідними параметрами, схильні в процесі роботи дії зовнішніх дестабілізуючих чинників, можуть бути представлені у вигляді об'єкту на який розповсюджуються принципи автоматичного управління.

Вихідні параметри зазвичай оцінюються якістю деталей, що виготовляються, а також технічними характеристиками верстатного устаткування і економічними показниками процесу різання.

1.3 Вибір переважних контрольованих параметрів для діагностики верстатної системи

Інформативні параметри верстатної системи служать ознаками, по яких діагностують стан верстатної системи (СВС). Діагностичною цінністю володіють ознаки, значення яких практично незмінні для однотипних верстатів, і разом з тим значно змінюються при переході від одного стану до іншого.

Різними фірмами використовуються:

- датчики, що вимірюють струм двигуна головного приводу;
- тензодатчики на спеціальних втулках в опорах ходових гвинтів для вимірювання відповідних осьових сил на ходових гвинтах;
- тензодатчики на підшипниках шпинделя для вимірювання трьох(два) сил різання, що становлять;
- датчики для виявлення деформацій шпинделя, що вимірюють положення фланця шпинделя.

Вимоги пред'являються до технічних характеристик датчиків:

- задана статична точність вимірювання;
- певні динамічні характеристики;
- надійність і довговічність.

У системі технічної діагностики переважними є непрямі інформативні параметри, які дозволяють без зміни конструкції верстатної системи здійснити контроль стану устаткування і протікання процесу механообробки (наприклад, термо - ЕДС).

1.4 Автоматизований контроль і діагностика інструменту в процесі механообробки. Завдання автоматизованого контролю і діагностики інструменту

Стан ріжучого інструменту (РІ) в період його експлуатації на верстаті визначається згідно ГОСТ 25751-83 сукупністю ознак, що характеризують здатність ріжучого інструменту виконувати обробку різанням в заданих умовах зі встановленими вимогами.

Стан РІ характеризується наступними ознаками:

- здатністю леза РІ зрізати припуск;
- здатністю леза РІ формувати поверхню обробки деталі заданих розмірів (геометрія), не виходячи за межі відповідних допусків;
- здатністю леза РІ формувати рельєф поверхні з параметрами, що не виходять за межі відповідних допусків.

Втрата лезом хоч би однієї з цих здібностей свідчить про відмову РІ і необхідності його заміни.

Таким чином, завдання контролю інструменту можна сформулювати як завдання своєчасної заміни інструменту, застережливого псування оброблюваної деталі і поломку інструменту, виготовлення якого вимагало б багато часу.

З метою запобігання поломкам РІ на практиці йдуть, як правило, шляхом зниження режимів різання і вимушеного зниження продуктивності токарної обробки. Заміну інструменту здійснюють комплексно, після закінчення періоду, встановленого розрахунковим або досвідченим шляхом.

Для зменшення простоїв устаткування, пов'язаних з неправильною роботою інструменту, необхідно враховувати декілька аспектів.

Перший аспект - обсервівання або своєчасне виявлення поломок інструменту в ході різання.

Другий аспект - ліквідація порушень нормального процесу різання, значень сили різання, що виявляються у вигляді зміни, амплітуди вібрацій, температури і так далі

Третій аспект - визначення моменту, коли подальше використання

інструменту небажане по економічних міркуваннях або із-за погіршення якості обробки деталей.

Крім розпізнавання порушень нормального різання і стану інструменту в завдання контролю процесу різання і інструменту повинні бути включені ще і завдання ухвалення рішень залежно від вигляду і причини порушень.

Таким чином, завдання оперативного контролю в частині, пов'язаній з контролем стану інструменту, є досить складними. Для їх успішного вирішення необхідно вирішити наступні питання:

- виявлення кореляційних зв'язків між різними порушеннями нормального стану інструменту і параметрами, зміряними в процесі різання;
- розробка критерію затуплення інструменту і алгоритмів розпізнавання порушень нормального стану інструменту за наслідками вимірювань різних параметрів і алгоритмів ухвалення рішень за наслідками розпізнавання;
- розробка датчиків (первинних перетворювачів) для вимірювання різних параметрів;
- розробка систем і пристроїв оперативного (тобто в процесі роботи) контролю;
- визначення умов їх ефективного застосування.

1.5 Моніторинг і діагностика вібрацій верстатів

В останні роки при відмові від обслуговування і ремонту техніки за регламентом її виведення у ремонт на практиці здійснюється трьома основними способами [4]:

- робота до відмови,
- виведення техніки в ремонт за результатами експертних оцінок,
- виведення техніки в ремонт за результатами діагностики і прогнозу його технічного стану.

Але значний економічний ефект дає лише третій спосіб. Успішне його використання дозволяє:

- скоротити час, обсяг ремонту і кількість запасних частин більше, ніж на третину,
- зменшити число раптових відмов у десятки разом,
- скоротити упущений прибуток через простої в декілька разів.

Для останнього способу необхідна повна діагностика об'єкта, причому бажано виявляти всі дефекти, що впливають на ресурс, щоб підготуватися до ремонту. В механіці, як показує практика, ефективна діагностика машин можлива, в основному, по вібрації, тому що:

- коливальні сили виникають безпосередньо в місці появи дефекту, а машина "прозора" для вібрації;
- вібрація містить максимальний об'єм діагностичної інформації;
- діагностувати можна на місці, без розбирання і зупинки устаткування.

Але глибока діагностика машин і устаткування по вібрації - це не тільки методи діагностики й апаратура для виміру й аналізу процесів. Є ще дві обов'язкові складові частини:

- база даних по вимірах великої кількості устаткування протягом тривалого часу з можливістю оперативно одержувати будь-які дані і проводити їхній аналіз;
- способи прийняття діагностичних рішень.

У першому питанні лідерами завжди були фірми США, що створювали протягом багатьох років ефективні комп'ютерні системи моніторингу, тобто спостереження за процесами, що протікають, у тому числі і за вібрацією машин і устаткування. До складу програмного забезпечення входила база даних із характеристиками контрольованого устаткування і результатами вимірів, зручний користувальницький інтерфейс з можливістю графічного аналізу з побудовою трендів, і іншими засобами представлення даних.

Друге питання в більшості систем діагностики вирішувалось одним способом - залученням експерта по діагностиці конкретного виду устаткування.

Але існує ще два можливих напрямки вирішення другого питання, це - розробка штучного інтелекту. Перший напрямок - навчання штучного інтелекту. Навчання проводить спочатку розроблювач системи, потім користувач доповнює

систему потрібними йому правилами. Другий напрямок - самонавчання (адаптивна) системи за жорсткими алгоритмами навчання, заданими розроблювачами.

Вібрація і шум - природні процеси, що протікають у машинах і устаткуванні, і збуджуються вони тими ж динамічними силами, що є причинами зносу і різних видів дефектів.

Природно, що вібрація і шум трансформуються одна в іншій на границях газового і твердого середовищ, а людина безпосередньо сприймає звук, і лише в обмеженому низькочастотному діапазоні - вібрацію.

За перехід вібрації в шум відповідає коливальна швидкість, що прямо пропорційна звуковому тиску в повітрі біля поверхні, що вібрує. Тому і норми на вібрацію, як правило, обмежують коливальну швидкість машин і устаткування.

Але вібраційний контроль і вібраційна діагностика - різні практичні задачі. У діагностиці дефект визначається коливальною силою, що діє в зоні дефекту, а сила зв'язана лінійно з коливальним прискоренням, а не зі швидкістю. Тому в діагностиці часто користуються вимірами віброприскорення, а для вібраційного контролю машин додатково вимірюють і віброшвидкість, причому лише в обмеженому низькочастотному діапазоні.

Є ще одна причина, по якій не рекомендується активно використовувати шум для діагностики машин. Ця причина - необхідність визначення форми коливань об'єкта в безпосередній близькості від місця виникнення дефекту. Тут значний внесок як у вібрацію, так і в шум вносять псевдоскладові складних форм.

Після перетворення сигналу вібрації (шуму) в електричний сигнал, останній необхідно ретельно аналізувати, одержуючи, а не втрачаючи діагностичну інформацію. До приладів, що аналізують, у діагностиці пред'являються самі жорсткі вимоги. До типових операцій, що повинні виконувати прилади, що аналізують вібрацію, варто віднести:

1. Визначення рівня (загального) вібрації в смузі частот, регламентованої стандартами вібраційного контролю.
2. Спектральний аналіз вібрації.

3. Аналіз коливань потужності окремих складової вібрації, попередньо виділених із сигналу вібрації.

4. Аналіз форми сигналу вібрації, тобто аналіз тимчасової розгортки сигналу (робота в режимі осцилографа).

Слід зазначити, що далеко не усі з систем, що випускаються промислово, можуть виконувати всі зазначені види аналізу, принаймні, із необхідною для діагностики точністю.

Одна з вимог, які ставляться до приладів контролю - висока лінійність. Природно, що межею є лінійність, обмежена динамічним діапазоном 80 дБ, тобто не гірше 0,01%. На практиці, як правило, вдається досягти в кращому випадку 0,03%, тобто спотворення з'являються на рівні -70 дБ, і це цілком достатньо для діагностичних вимірів.

Наступна вимога пред'являється до величини частотного діапазону. Типові вимоги - від 2 Гц до 20 кГц, але іноді потрібно збільшення діапазону частот. У ряді випадків необхідно збільшення діапазону зверху до 40 кГц, у деяких галузях промисловості потрібно розширення діапазону частот знизу до 0,3 Гц або навіть до нуля. Критеріїв тут не існує. І, нарешті, остання вимога - по роздільній здатності приладів. Типові вимоги - від 100 до 800, але в деяких приладах зустрічається і більша кількість смуг - до 6400 і вище.

У кожній машині діють динамічні сили. Ці сили - джерело не тільки шуму і вібрації, але і дефектів, що змінюють властивості сил і, відповідно, характеристики шуму і вібрації. Можна сказати, що функціональна діагностика машин без зміни режиму їхньої роботи - це вивчення динамічних сил, а не власне вібрації або шуму. Останні просто містять у собі інформацію про динамічні сили, але в процесі перетворення сил у вібрацію або шум частина інформації втрачається. Ще більше інформації втрачається при перетворенні сил і що робиться ними роботи в теплову енергію. Саме тому з двох видів сигналів (температура і вібрація) у діагностиці перевагу варто віддати вібрації.

Основні динамічні сили, що діють у машинах роторного типу, збуджуючи їхню вібрацію або шум, приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Типи коливальних сил, що діють у машинах роторного типу

СИЛА	ДЖЕРЕЛО
1. Механічної природи	
Відцентрова	Незрівноваженість ротора
Кінематична	Нерівність поверхні
Параметрична	Флуктуації жорсткості вала, підшипників і т.д.
Сили тертя	Вузли тертя кочення і ковзання
Удари	Дефектні поверхні тертя
2. Електромагнітної природи	
Магнітні	Флуктуації об'єму повітряного зазору в магнітопроводі
Електродинамічні	Перемінного складового струму і потоку
Магнітострикційні	Ефект магнітострикції в магнітопроводі
1. Гідро(аеро)динамічної природи	
Піднімальні (обтікання)	Рух лопасті в неоднорідному потоці або групи неоднакових лопастей в однорідному потоці
Сили тертя	Границя потоку і нерухомих частин
Пульсації тиску	Турбулентність потоку, зрив вихорів, кавітація

1.6 Висновки і постановка задач дослідження

Проведений аналіз показав наступне:

1. Дуже важливі завдання теорії контролездібності пов'язані з розробкою алгоритмів пошуку несправностей, розробкою діагностичних тестів, мінімізацією процесу встановлення діагнозу.

2. В області побудови математичних моделей і моделювання процесів технічної діагностики з використанням програмних засобів на даний час накопичений достатній досвід.

4. Діагностичними параметрами технічного стану верстату виступають: параметри, що характеризують працездатність устаткування; різні пошкодження; непрямі ознаки.

5. Для автоматизації та підвищення ефективності діагностування верстатів необхідні процедури перетворення параметрів конкретної верстатної системи відповідно до параметрів діагностичної системи.

Результати проведеного аналізу дозволяють сформулювати наступні задачі

дослідження:

1. Розробити математичні моделі діагностики технологічної системи металорізального верстату.

2. Розробити об'єктні програми і схеми діагностування в програмному середовищі високого рівню.

3. Розробити програми для підготовки даних і аналізу результатів діагностування.

4. Розробити загальну структуру програмних засобів діагностування верстату.

5. Провести апробацію розроблених програмних засобів.

2 ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ВЕРСТАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМОВІРНІСНИХ ЛАНЦЮГІВ БАЙЄСА

2.1 Задача діагностики верстата як слабкоструктурована проблема системного аналізу

Послідовність дій, спрямованих на встановлення структурних зв'язків між змінними або елементами досліджуваної системи, відома як системний аналіз, є науковим методом пізнання, який базується на поєднанні загальнонаукових, експериментальних, природничих, статистичних і математичних методів. Універсальний, наддисциплінарний і міждисциплінарний – ознаки характеру системного аналізу.

Особливості прикладного системного аналізу включають наступне:

- він використовується для вирішення проблем, які не можуть бути вирішені окремими методами математики, наприклад, проблеми з невизначеністю ситуації прийняття рішення;
- він використовує не лише формальні методи, але й методи якісного аналізу, які стимулюють використання досвіду та інтуїції фахівців;
- він поєднує різні методи за допомогою єдиної методики;
- спирається на науковий світогляд, зокрема, на діалектичну логіку;
- дає можливість об'єднати знання, судження і інтуїцію фахівців різних галузей знань, зобов'язавши їх до певної дисципліни мислення;
- основна увага приділяється цілям і процесу їх формування.

Сфери застосування прикладного системного аналізу можна визначити з точки зору характеру завдань, що вирішуються:

- завдання, пов'язані з перетворенням і аналізом цілей і функцій;
- завдання розробки або вдосконалення структур;
- завдання проектування.

Цільове призначення усього системного аналізу полягає в тому, щоб в результаті здійснити вибір. Вибір або прийняття рішення є суттю поставленого завдання системного аналізу, кінцевим підсумком усієї роботи.

Кожне рішення залежить від ласу поставлених задач. Всі проблеми, що розглядаються в рамках системного аналізу, розподіляються на три типи [4]:

- добре структуровані;
- неструктуровані;
- слабкоструктуровані .

Проблеми, які добре структуровані (*well-structured*), або кількісно сформульовані, мають чіткі пояснення та кількісні характеристики. Добре структуровані проблеми повторюються і можуть бути формалізовані та автоматизовані. Даний тип задач розв'язується за допомогою математичних методів, що дозволяють формалізувати задачу: методи математичного програмування, дослідження операцій (лінійного, нелінійного, динамічного програмування, теорії ігор, теорії масового обслуговування тощо);

Неструктуровані (*unstructured*), або якісно виражені проблеми, які мають лише опис найважливіших ресурсів, ознак і характеристик, кількісні залежності між якими абсолютно невідомі. Неструктуровані проблеми припускають своє рішення лише на основі людської інтуїції та міркувань людини, досліджуються методами теорії евристичних рішень: метод Дельфі, метод Кінгсе, метод Курно.

Слабоструктуровані (*ill-structured*) або змішані проблеми включають як кількісні, так і якісні компоненти. Такі проблеми переважно маловідомі, мають невизначені сторони, залежності, ознаки та характеристики, які не піддаються кількісному аналізу. Слабоструктуровані рішення поєднують в собі знання особи, що приймає рішення (ОПР), і можливості комп'ютера. Система в даному випадку виступає деяким симбіозом людини і машини. Комп'ютер використовується тут лише як інструмент для обчислень.

Дослідниками виділяються три класи невизначеностей, що пов'язані з неповним розумінням проблеми; з неможливістю точної оцінки реакції зовнішнього середовища на прийняте і виконане рішення; пов'язані з неповним або неточним розумінням цілей ОПР. Привести ці невизначеності до точного рішення неможливо в принципі, оскільки це означало б зробити їх "визначеними", тобто усунути невизначеності. Одним з шляхів зниження невизначеностей є створення такого інформаційного оточення ОПР, яке в умовах необхідності

врахування багатьох чинників, що постійно змінюються, постійного зростання об'ємів інформації дозволило б об'єктивніше оцінювати як ситуацію, що склалася, так і наслідки прийняття рішень.

Виділення добре структурованих, слабкоструктурованих і неструктурованих задач звичайно ж, умовно, оскільки чітких розмежувань тут зробити неможливо. Добре структуровані завдання впорядковані, і рішення їх є процесами, що повторюються, крім того, вони однозначні оскільки кожне завдання має єдиний метод вирішення. Слабкоструктурована задача має більше можливих методів рішення, і самі рішення можуть сильно відрізнятися один від одного. Неструктурована задача або взагалі не має відомих методів рішення, або має їх надто багато.

Розглядаючи їх більш детально, можна виділити наступні характеристики слабкоструктурованих проблем:

- 1) задача не може бути представлена у числовій формі;
- 2) цілі не можуть бути представлені в термінах чітко визначеної цільової функції;
- 3) практично не існує алгоритмічного розв'язку задачі;
- 4) якщо існує алгоритмічний розв'язок то він не може бути використаний через обмеження ресурсів (час, пам'ять...).

До слабкоструктурованих проблем відносяться найбільш складні задачі економічного, технічного, політичного, військово-стратегічного характеру. Розв'язання проблем, що мають "слабкоструктурований характер", і є основним завданням системного аналізу.

Задачу технічної діагностики (ТД) верстата цілком можна віднести до слабкоструктурованої проблеми, оскільки:

- технологічний робочий простір (ТРП) верстата уявляє собою деяку розмиту, не строго визначену область;
- задача ТД не може бути виражена в числовій формі;
- цілі ТД не можуть бути представлені у термінах точно визначеної цільової функції;
- майже не існує алгоритмічного розв'язку задачі ТД.

2.2 Підходи щодо розв'язання слабоструктурованих задач

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) є прикладом методології системного аналізу, яка використовується для вирішення проблем, які не дуже структуровані.

У системному підході до аналізу слабоструктурованих задач ключову роль відіграє загальне поняття системи, що є основним об'єктом досліджень системного аналізу [9]. Система являє собою визначене цілісне середовище системного дослідження, яку з позиції досягнення поставлених цілей вибирає, формує або створює людина. Система може бути матеріальним об'єктом або деякою моделлю матеріального або абстрактного об'єкту досліджень.

Моделювання є одним з найбільш універсальних способів вивчення різноманітних процесів та явищ. В наукових дослідженнях та інженерній практиці широко використовуються численні методи і прийоми моделювання. При цьому розрізняють фізичне і математичне моделювання.

При фізичному моделюванні модель відображає поведінку об'єкту, що вивчається, зі збереженням його фізичної природи. Між об'єктом, що вивчається, і його моделлю мають бути збережені деякі співвідношення подоби, що витікають із закономірностей фізичної природи явища і забезпечують можливість використання даних, що отримуються за допомогою моделювання для оцінки властивостей і характеристик об'єкту, що вивчається.

Фізичне моделювання має обмежену сферу застосування. Більш широкі можливості має математичне моделювання. Це спосіб дослідження об'єктів на основі вивчення явищ, що мають різноманітний фізичний зміст, але описуються однаковими математичними співвідношеннями. При цьому співвідношення подоби повинні зберігатись між змінними математичної моделі та найбільш важливими властивостями і характеристиками об'єкта, що вивчається.

На практиці часто використовуються різноманітні різновиди математичних моделей, що засновані на поєднанні можливостей сучасної математики і обчислювальної техніки, наприклад графічні та імітаційні моделі. Так, графічна модель оперує системою взаємопов'язаних креслень і зображень для

відображення реальних взаємозалежностей, характерних для досліджуваного об'єкту. Імітаційна модель являє собою систему взаємопов'язаних комп'ютерних програм для імітації поведінки об'єкта.

Як вже було сказано вище, об'єктом системного аналізу є слабкоструктуровані проблеми. Тому і методи його націлені на "зняття" цієї слабкої структурованості систем шляхом структуризації, тобто вибору ієрархії цілей, завдань, взаємних зв'язків елементарних об'єктів, що визначають масштабність системи, управляючих та інформаційних зв'язків, ієрархію показників ефективності, їх динаміку.

У своєму розвитку системний аналіз спирався на методи дослідження операцій, які в своїй більшості використовують математичний апарат. Долаючи цю однобічність методології дослідження операцій, системний аналіз вводить у свою методологію логічну складову в дослідження проблем технічної діагностики. І залежно від проблеми дослідник приймає рішення у використанні тих або інших методів.

Ще одним науковим напрямом, що лежить в основі дослідження слабкоструктурованих систем, є методологія когнітивного моделювання. У рамках когнітивної моделі інформація про систему представляється у вигляді набору понять (факторів) і пов'язуючої їх причинно-наслідкової мережі, що має назву когнітивна карта, яка є віддзеркаленням суб'єктивних представлень експерта (чи групи експертів) про закони і закономірності, властиві модельованій системі. До когнітивної карти застосовуються методи аналітичної обробки, орієнтовані на дослідження структури системи і отримання прогнозів її поведінки при різних управляючих подіях з метою синтезу ефективних стратегій управління.

Для розв'язання складних, в тому числі слабо структурованих, проблем було розроблено процедуру прийняття рішень [14], що складається з наступних етапів:

- 1) створення проблемної ситуації;
- 2) визначення цілей;
- 3) визначення критеріїв досягнення цілей;

- 4) створення моделей для обґрунтування рішень;
- 5) пошук оптимального (прийняттого) варіанту рішення;
- 6) узгодження рішення;
- 7) підготовка рішення до реалізації;
- 8) затвердження рішення;
- 9) керування ходом реалізації рішення;
- 10) перевірка ефективності рішення.

Основними інструментами розв'язання слабоструктурованих проблем є:

- імітаційне моделювання;
- кореляційний, регресійний та кластерний аналіз;
- методи статистичної класифікації;
- методи аналізу ієрархій;
- теорія матриць;
- теорія експертних оцінок;
- нечітка логіка;
- нейронні мережі;
- генетичні алгоритми;
- мережі Байєса.

Слід зазначити, що на сьогодні існує декілька комп'ютерних програм для роботи з мережами Байєса, але саме для ТД верстатів на жаль немає спеціалізованого пакету. Тому вони при використанні цих програмних продуктів потребують додаткової і трудомісткої підготовки даних.

2.3 Графічне та математичне представлення мереж Байєса

2.3.1 Графова структура мереж Байєса

Мережі Байєса (БМ) складаються з графів, які мають певні особливості. Граф — це сукупність вершин або вузлів, з'єднаних дугами. Дуга показує, що існує причинний зв'язок між вершинами. Зсув дуги означає лише наявність зв'язку між вузлами. Направлені дуги також показують напрям залежності, тобто від причини до наслідку. Графи, які містять лише дуги без напрямку, називаються

ненаправленими, а графи, які містять лише дуги з напрямом, називаються направленими [8].

Згідно з рис. 2.1, а, направлений граф є ациклічним, якщо для будь-якої вершини графу не існує направленої шляхи, що починається та закінчується в цій вершині. В іншому випадку граф називається циклічним (рис. 2.1, б).

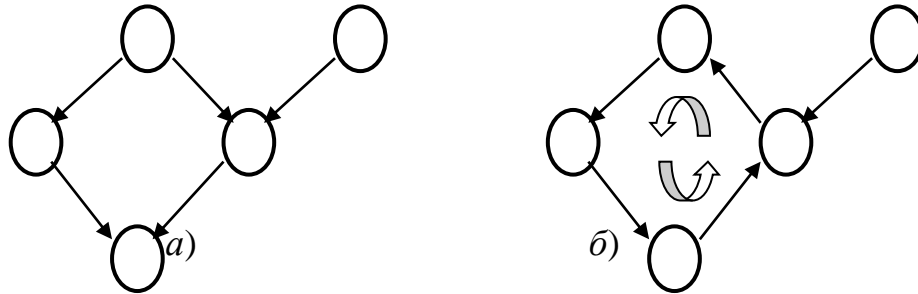


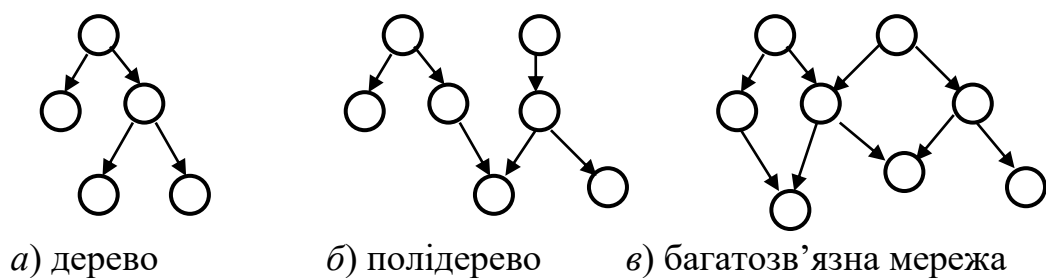
Рис. 2.1 – Приклад ациклічних *a)* та циклічних *б)* графів

Розрізняють наступні типи структур графів БМ [8]:

– Дерево – це структура, в якій кожна вершина може мати одну батьківську (рис.2.2, *a*).

– Однозв’язна мережа, також відома як полідерево, є структурою, в якій кожна вершина може мати кілька батьків, але існує лише один (ненаправлений) шлях між двома вершинами (рис. 2.2, *б*).

– Багатозв’язні мережі можуть мати кілька шляхів між двома вершинами (рис.2.2,в). Такі мережі користуються попитом під час виконання різноманітних завдань.



a) дерево

б) полідерево

в) багатозв’язна мережа

Рис. 2.2 – Структури графів БМ

Направлені графи містять батьків, нащадків і кореневі вершини та листки.

Нашадки — це вершини, які залежать від однієї або більше інших вершин. Таким чином, батьківські вузли включають одного або більше поколінь. Одна і та ж вершина може мати як батьківське, так і спадкове походження. Кореневі вузли і листки не мають батьків.

Опишемо мережу Баєса. БМ складається з $\langle G, B \rangle$, де G — це направлений ациклічний граф, а B — це множина параметрів, що визначають мережу, або множину таблиць умовних ймовірностей вершин (ТУЙ, СРТ - conditional probability table) [8]:

Відповідно, $P = P(X^{(i)} | pa(X^{(i)}))$, $i = 1 \dots N$ для кожного можливого значення $x^{(i)} \in X^{(i)}$ та $pa(X^{(i)}) \in Pa(X^{(i)})$, де $pa(X^{(i)})$ - множина батьків змінної $X^{(i)} \in G$.

Вершина мережі Байєса складається з кожної змінної $X^{(i)} \in G$. Формула, за допомогою якої можна обчислити повну загальну ймовірність БМ, є такою [8]:

$$P(X^{(1)}, \dots, X^{(N)}) = \prod_{i=1}^N P(X^{(i)} | pa(X^{(i)})). \quad (2.1)$$

З математичної точки зору БМ — це модель подання існуючих і відсутніх імовірнісних залежностей. Це означає, що зв'язок $A \rightarrow B$ є причинним, коли подія A є причиною виникнення B , або коли існує механізм, який впливає на значення A .

Формула Байєса — це раціональний вибір в ситуаціях, коли інформація недостатня. Дедукція та індукція є двома протилежними підходами до процесу прийняття рішень. У методі дедукції керуються певною гіпотезою або припущенням про сутність події та припускають, що ця гіпотеза справді відбудеться.

Дедукція вважається об'єктивним методом, оскільки між гіпотезою та передбачуваним розвитком подій існує стійкий зв'язок. Однак цей метод може лише підтверджувати або спростовувати гіпотезу, а не створювати нові знання.

Індукція — має протилежну спрямованість: вона створює і оцінює гіпотези на основі досвіду. Переваги індуктивного методу аналізу полягають у тому, що люди можуть отримати додаткову інформацію про явища, про які раніше не знали, створити нові гіпотези та розширити свої знання про світ навколо них. Але разом з тим, є і проблема індукції — впевненість у правильності аргументів.

Отже, метод дедукції є більш надійним і об'єктивним, але індуктивний метод більш продуктивний.

Нехай Ω є випадковим простором (множиною) подій випадкового експерименту, який володіє всіма потенційними значеннями випадкової змінної. Розглянемо дві події: $E \in \Omega$ є спостереженням, а $H \in \Omega$ є гіпотезою. Формула Байєса може бути використана для визначення ймовірності того, що подія E відбудеться за умови, що подія H вже відбулася. Таким чином, умовна ймовірність E при певній події H має бути знайдена шляхом обчислення $P(E|H)$ [8].

За умови, що вона не дорівнює нулю, умовна ймовірність $P(E|H)$ дорівнює відношенню сукупної ймовірності подій E та H $P(E \cap H)$ до ймовірності події H :

$$P(E|H) = \frac{P(E \cap H)}{P(H)}. \quad (2.2)$$

Аналогічно до події H , правило Байєса можна записати таким чином:

$$P(H|E) = \frac{P(H \cap E)}{P(E)}. \quad (2.3)$$

а враховуючи властивість комутативності сукупної ймовірності:

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)}. \quad (2.4)$$

Наведена формула демонструє причинно-наслідкові зв'язки між гіпотезами та спостереженнями. Ймовірності $p(H)$ і $p(E|H)$ є апіорними, що означає, що вони визначаються до початку спостережень. Ймовірність $P(H/E)$ вказує на протилежну сторону. Байєсівський метод (БМ) має перевагу в тому, що апіорні ймовірності можна уточнити або змінити, щоб вони відповідали реальним процесам, що досліджуються. Це дозволяє уточнювати ймовірність подій, коли є більше інформації.

Основним припущенням теорії побудови БМ є те, що події є вичерпними ($\cup_{i=1}^n H_i = \Omega$) і не перетинаються. Ймовірність події E можна обчислити за допомогою умовних ймовірностей при виконанні цих умов.

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i) p(H_i). \quad (2.5)$$

Підставивши вираз (2.5) у формулу (2.4), отримаємо:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i) p(H_i)}. \quad (2.6)$$

Ця формула служить основою для побудови БМ.

Формула Байєса успішно використовується в багатьох сферах людської діяльності, включаючи системи прийняття рішень для вирішення складних проблем у реальному світі. Наприклад, унікальна здатність класифікувати об'єкти за допомогою її широко використовується в комп'ютерному програмуванні як спам-фільтри, у медицині для постановки діагнозів і в програмуванні рухів тіла, в проектуванні аерокосмічних засобів, оцінці ризиків, розробці механізму логічного висновку експертних систем, системах прийняття рішень, оцінці катастроф тощо.

2.3.2 Типи байєсових мереж

Існують наступні типи мереж Байєса: дискретні; динамічні; неперервні; гібридні. Вони класифікуються за типами станів вершин і характеристиками самих вершин [8].

Межі, у яких змінні вузлів представлені дискретними величинами, називають *дискретними* БМ. Рис. 2.3 показує приклад дискретної БМ, а також таблиці умовних ймовірностей її вершин. В дискретних БМ таблиці умовних ймовірностей (ТУЙ) визначають вершини з «батьківські», а вершини без «батьків» визначаються безумовними (маргінальними) ймовірностями.

Межі, у яких значення вузлів змінюються з часом, відомі як *динамічні* байєсові мережі. Вони підходять для моделювання часових процесів, тому вживають термін «часова байєсівська мережа» Приховані моделі Маркова (Hidden Markov Models), лінійні динамічні системи (LDS) і фільтри Калмана є прикладами динамічних мереж Байєса.

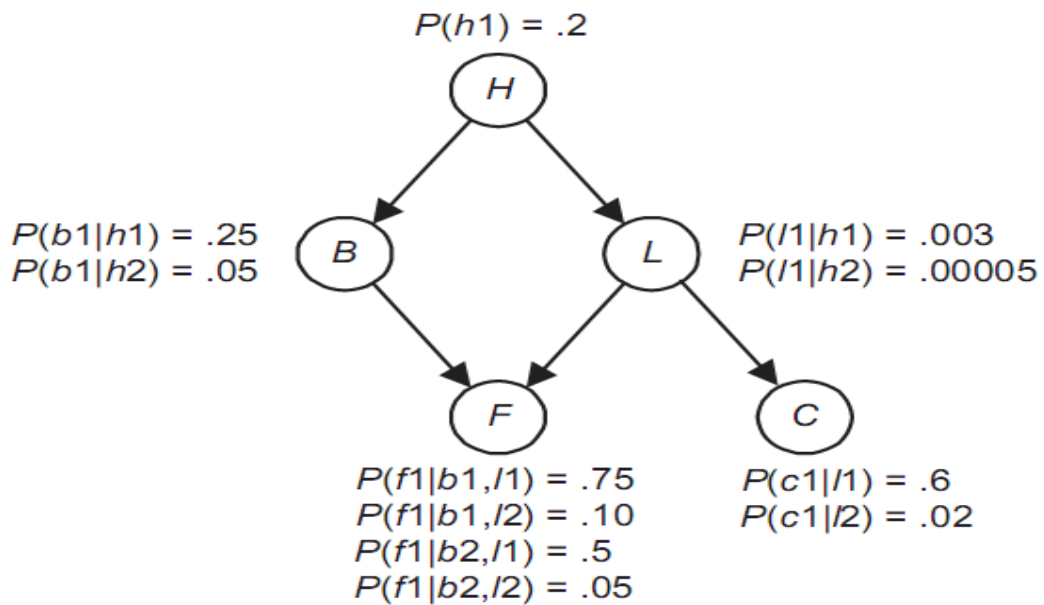


Рис. 2.3 -Дискретна БМ

Прихована модель Маркова є найпростішим типом динамічної БМ, у якій у кожному шарі є одна дискретна прихована вершина (рис. 2.4) та одна дискретна або неперервна спостережувана вершина [9]. Випадкова змінна $x(t)$ є значенням прихованої змінної в момент часу t . Випадкова змінна $y(t)$ - це значення спостережуваної змінної в момент часу t . Стрілки на діаграмі символізують умовні залежності.

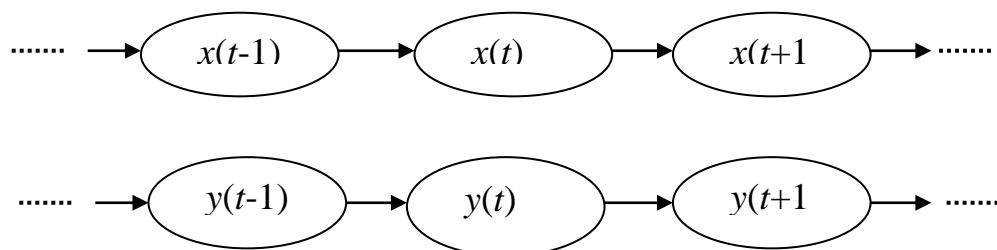


Рис. 2.4 – Прихована модель Маркова

Значення прихованої змінної в момент часу t називається випадковою змінною $x(t)$. Значення змінної, спостережуваної в момент часу t , називається випадковою змінною $y(t)$. На діаграмі умовні залежності представлені стрілками. Значення прихованої змінної $x(t)$ (в момент часу t) відповідно залежить лише від значення прихованої змінної $x(t-1)$ (в момент часу $t-1$). Це і є властивість Маркова. Єдине, що залежить від значення прихованої змінної $x(t)$ у момент часу t – це

значення спостережуваної змінної $y(t)$.

Динамічну мережу можна визначити, додавши початковий розподіл $P(X(t))$, топологію всередині шару $P(X(t+i) | X(t+i-1))$ і між двома шарами - $P(Y(t) | X(t))$ [30].

Неперервні мережі БМ мають неперервні вершини. Стохастичні процеси у просторі станів з неперервним часом моделюються неперервними БМ. У більшості випадків події можуть приймати будь-який стан у певному діапазоні. Таким чином, змінна X буде неперервною випадковою величиною в просторі допустимих значень, який складається з нескінченної множини точок і визначається як $X = \{x \mid a \leq x \leq b\}$.

Розглянемо неперервну БМ з розподілом Гауса (рис 2.5). Нехай вузол X має безліч батьків $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ і умовний розподіл для нього визначається за формулою $f(X | U_i) = N(x; \mu_x + b_i \cdot \mu_i, \sigma_x)$, де μ – математичне очікування, σ – дисперсія, коефіцієнт b_i – ваговий коефіцієнт, який показує зв'язок між X та його i -м батьком [32]:

$$N(x; \mu_x + b_i \cdot \mu_i, \sigma_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left(-\frac{(x - (\mu_x + b_i \cdot \mu_i))^2}{2\sigma_x}\right). \quad (2.7)$$

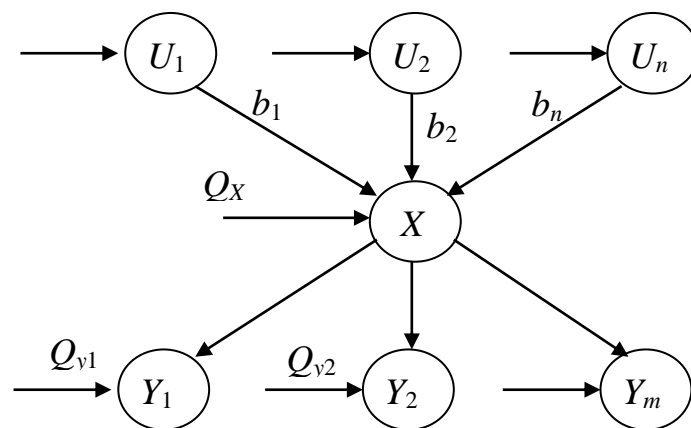


Рис. 2.5 – Неперервна БМ ; U_1, U_2, \dots, U_n – батьківські вузли Y_1, Y_2, \dots, Y_m – дитячі вузли змінної X , b_1, b_2, \dots, b_n – вагові коефіцієнти, $Q_x, Q_{u1}, \dots, Q_{un}, Q_{y1}, \dots, Q_{ym}$ – шумові коефіцієнти.

Звичайна лінійна регресійна модель може бути використана для зображення зв'язку між змінною X і її батьками (U_1, U_2, \dots, U_n):

$$X = b_1 \cdot U_1 + b_2 \cdot U_2 + \dots + b_n \cdot U_n + Q_x, \quad (2.8)$$

де Q_x – шумова компонента, яка може бути записана як розподіл Гауса з нульовим математичним сподіванням, а регресійні коефіцієнти b_1, b_2, \dots, b_n які показують зв'язок між змінною X і її батьками U_1, U_2, \dots, U_n .

Гібридні байєсові мережі використовують як дискретні, так і неперервні змінні. При використанні БМ, що містить як неперервні, так і дискретні змінні, є маємо певні обмеження. Ці обмеження включають наступне: неперервні змінні не можуть мати неперервних батьків; неперервні змінні повинні мати нормальний закон розподілу, умовний на значеннях батьків; розподіл неперервної змінної X з дискретними батьками Y та неперервними батьками Z є нормальним розподілом [29]:

$$P(X/Y = y, Z = z) = N(\mu_x(\mu_y, \mu_z), \sqrt{\sigma_x(\sqrt{\sigma_y})}),$$

де x, y, z є математичними очікуваннями. Тим не менш, x та σ_x залежать від дискретних батьків; μ_x, μ_y, μ_z – математичні очікування; σ_x, σ_y – дисперсії, $\sqrt{\sigma_x}, \sqrt{\sigma_y}$ – відхилення (середньоквадратичне).

Як показано на малюнку 2.6, незалежні дискретні випадкові величини X_1, \dots, X_s і неперервні випадкові величини Z_1, \dots, Z_r повинні впливати на результативну випадкову величину Y . Квадратні вершини відповідають дискретним подіям, тоді як круглі вершини відповідають неперервним подіям. Для кожної дискретної випадкової величини X_j ($j = 1, \dots, s$) існує значення

X_i ($i = 1, \dots, n_j$) з ймовірностями P_{ij} і сумою $\sum_{i=1}^{n_j} P_{ij} = 1$.

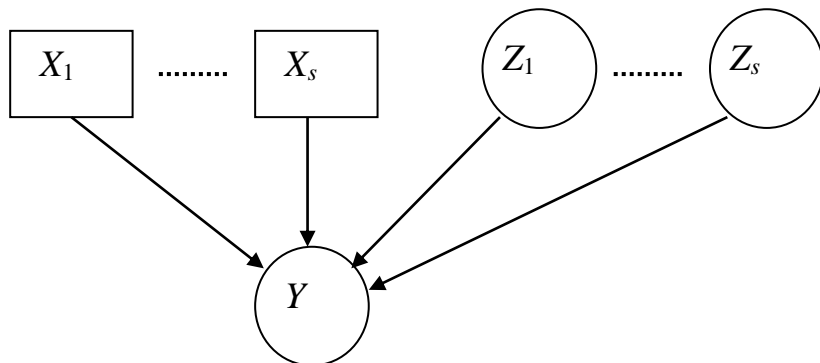


Рис. 2.6 – Приклад гібридної БМ

Спільний вплив дискретних випадкових величин на Y характеризується математичними очікуваннями $(\mu_{i1}, \dots, \mu_{is})$ та дисперсіями $((\sigma_{i1}, \dots, \sigma_{is}))$. З параметрами (μ_l, σ_l) , кожна з неперервних випадкових величин Z_l має неперервний нормальний розподіл, де $l = 1, \dots, r$. Вагові коефіцієнти k_l, i_1, \dots, i_s для $l = 1, \dots, r$ показують спільний вплив неперервної випадкової величини Z_l та результатів дискретних величин на результуючу випадкову величину Y .

Таким чином, формули можна використовувати для визначення характеристик отриманої величини Y [29].

$$\mu = \sum_{i1}^{n1} \dots \sum_{is}^{ns} p_{1,i1} \dots p_{s,is} \left(\mu_{i1\dots is} + \sum_{l=1}^r K_{l,i1\dots is} \cdot \mu_l \right); \quad (2.9)$$

$$\sigma = \sum_{i1}^{n1} \dots \sum_{is}^{ns} p_{1,i1} \dots p_{s,is} \cdot \left[\left(\mu_{i1\dots is} + \sum_{l=1}^r K_{l,i1\dots is} \right)^2 + \sigma_{i1\dots is} + \sum_{l=1}^r K_{l,i1\dots is}^2 \cdot \sigma_l \right] - \mu^2. \quad (2.10)$$

2.4 Побудова мереж Байєса з прихованими вершинами за навчальними даними

Завдання побудови БМ можна вирішити різними способами, включаючи використання прихованих змінних. Змінні, значення яких не можна побачити, називаються прихованими. Незважаючи на те, що методи побудови мереж Байєса за навчальними даними продовжують розвиватися [24], побудова мереж з прихованими вершинами продовжує бути головним питанням у дослідженні мереж Баєса.

Більшість досліджень проводяться з припущенням, що дані є повними, тобто значення всіх змінних відомі в базі даних для кожного випадку. Насправді це не так, оскільки приховані змінні мають вирішальне значення для багатьох реальних проблем; наприклад, кореляція симптомів може вказувати на важливу приховану проблему в діагностичних системах. Насправді приховані змінні є лише кінцевим механізмом, який «захоплює» та «проводить» інформацію до іншої частини мережі з деяких змінних, які спостерігаються. Таким чином, загальний ймовірний вихід можна покращити завдяки використанню прихованих змінних, які можуть значно спростити структуру БМ.

Отже створення БМ означає вибір найкращої структури мережі. Оптимізація означає, що структура, яка буде обрана, буде максимально правдоподібно відповідати навчальним даним або процесу, який моделюється. Розв'язання наступних завдань розуміється як «побудова БМ»:

- 1) визначення найкращої структури БМ, тобто направлено ациклічного графа, який найкраще відповідає навчальним даним або досліджуваному процесу;
- 2) обчислення значень таблиць умовних ймовірностей БМ для кожної вершини цього графа.

Переважає більшість методів, які зараз використовуються, стикаються з наступними проблемами:

1. Наявність множини впорядкованих вершин. Більшість методів, особливо старих, вважають, що ця множина задана; однак у реальному світі це часто не так.

2. Низька продуктивність обчислень. Сучасні методи не використовують впорядковану множину вершин; вони використовують тест на умовну незалежність. Але в цьому випадку необхідно виконати експоненціальну кількість таких тестів. Але оскільки об'єм обчислень збільшується, то це призведе до зменшення ефективності методу.

3. Проблема створення великих БМ. Існує кілька способів побудувати структуру БМ з сотнями вершин, використовуючи навчальну вибірку з мільйонів записів. Такими методами є Tetrad II [38] та SopLeq [27].

Приховані змінні, або латентні змінні, які не спостерігаються та недоступні для навчання, є частиною реальних завдань технічної діагностики (і діагностики загалом) [34]. Наприклад, пошуки поступової втрати точності обробки на верстаті часто включають описи ознак, які спостерігаються, методи відновлення, які застосовуються, результати цих досліджень, але рідко містять відомості про безпосереднє спостереження за розвитком самого джерела втрати точності.

Питання, яке є очевидним, полягає в наступному: «Якщо хід розвитку джерела дефекту не спостерігається, то чому не побудувати б модель без нього?» На малюнку 1 показана невелика фіктивна діагностична модель, яка дає відповідь на це питання. Три фактори, які спостерігаються, сприяють або перешкоджають

розвитку дефекту, а також три ознаки. Кожна змінна має три варіанти: нічого (відсутній), помірний (помірний) і серйозний. Три фактори Φ , що сприяють розвитку дефекту, і три ознаки O спостерігаються. Створення мережі, показаної на рис. 2.8, б, здійснюється шляхом видалення прихованої змінної Π з мережі, показаної на рис. 2.8, а. У результаті загальна кількість параметрів збільшується з 78 до 708. Таким чином, використання прихованих змінних дозволяє значно зменшити кількість параметрів, необхідних для визначення БМ. Крім того, даний факт дозволяє значно зменшити обсяг даних, необхідних для визначення під час процесу навчання даних параметрів.

Хоча приховані змінні є важливими, навчання стає складніше, коли їх включають. Наприклад, на рис. 2.8 а не показано, як знайти в процесі навчання розподіл умовних ймовірностей для змінної Π , якщо задані її батьківські змінні, оскільки значення змінної Π невідоме для кожного випадку. Проблема, яка виникає при пошуку розподілів ймовірностей для ознак O , також є.

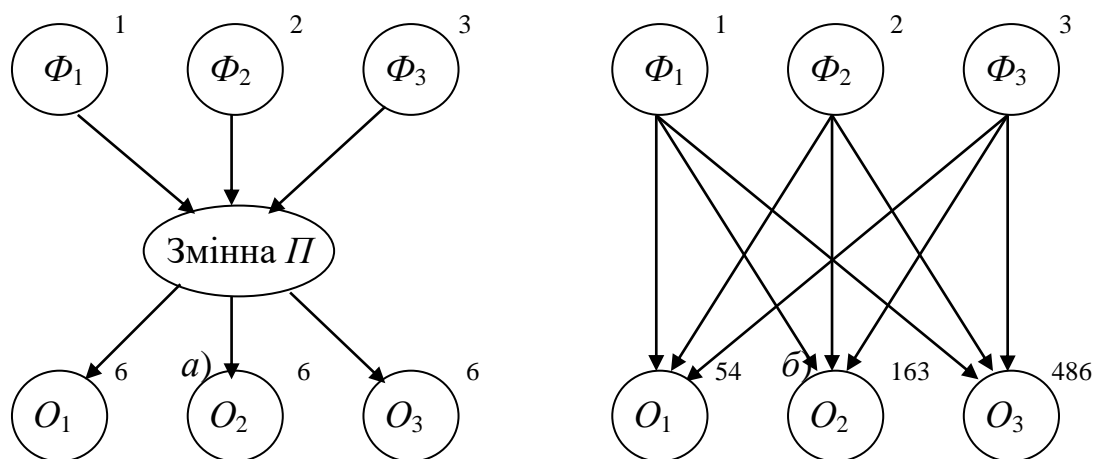


Рис. 2.8 – Доказ того, що використання прихованих змінних є необхідним

Таким чином, переваги використання прихованих вершин в мережах Байєса включають: значне спрощення структури мережі; зменшення кількості параметрів, необхідних для визначення БМ, що дозволяє значно зменшити обсяг даних, необхідних для навчання цих параметрів.

Використання прихованих вершин в мережах Байєса створює і проблеми для навчання БМ. Якщо структура мережі невідома, проблема визначення кількості прихованих вершин, їх місця розташування та станів кожної з них

залишається невирішеною.

Але для ТД верстатів приховані вершини БМ необхідні, оскільки неможливо постійно спостерігати за усіма елементами технологічної системи, наприклад за станом зубчастих коліс коробки швидкостей шпиндельної групи.

2.5 Методика знаходження параметрів байєсових мереж з прихованими вершинами

Розглянемо метод обчислення параметрів БМ за умови неповної вхідної інформації та відомої топології мережі на основі алгоритму максимізації математичного очікування. Це комплексна система, яка описує повний процес знаходження невідомих параметрів прихованих вершин і складається з наступних етапів: 1) створення БМ за навчальними даними або «вручну»; 2) генерування вибірки відповідно до заданої структури мережі (застосовується в ситуаціях, коли навчальних даних немає); і 3) включити приховані вершини до структури мережі; 4) перша активація невідомих параметрів мережі; 5) використання алгоритму ЕМ для обчислення параметрів мережі на основі даних, які були створені.

Схематична структура знаходження параметрів байєсових мереж з прихованими вершинами показано на рис. 2.9.

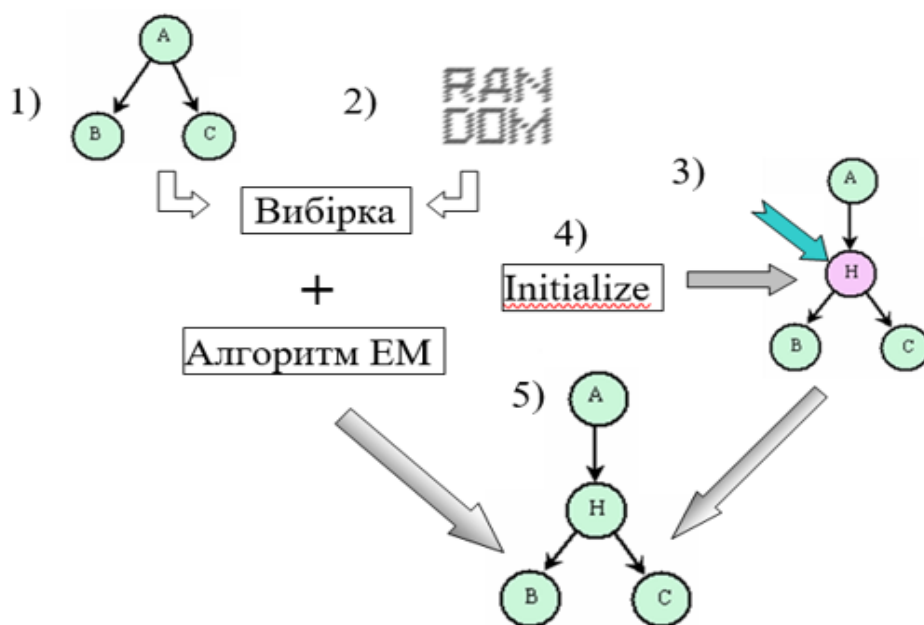


Рис. 2.9 – Схема структури знаходження параметрів байєсових мереж з прихованими вершинами.

На початку потрібно побудувати БМ, тобто визначити топологію та значення параметрів мережі. На цьому етапі є лише навчальні дані або структура мережі відома і нам залишається перенести її в програмне середовище та заповнити ТУЙ. В іншому випадку побудова структури відбувається в два етапи. На першому етапі використовується евристичний алгоритм для створення топології мережі, а на другому етапі знаходяться параметри мережі, які максимально наближені до навчальних даних.

На другому етапі використовується структура мережі, побудованої на першому етапі, для псевдовипадкової генерації вибірки, якщо навчальні дані не задані або їх недостатньо. Наступним чином відбувається генерація. По-перше, ймовірнісний висновок робиться в мережі без інстанційованих вершин $P(S_{ij}), i=1, \dots, N; j=1, \dots, S$. Далі вибирається вершина N_{i^*} , а потім інстанціюється один із її станів $S_{i^*j^*}$, який має ймовірність $P(S_{i^*j^*})$. Після інстанціювання $P(S_{i^*=} S_{i^*j^*})$ перераховуються ймовірності станів вершин. Далі вибирається найвищий рівень. Доки не залишиться неінстанційованих вершин, ця процедура повторюється. У вибірці записуються стани, які були ідентифіковані $(S_{i_1} \dots S_{i_N}), i_k \in (1, \dots, S)$. Доки не буде створено достатню кількість записів у вибірці, алгоритм повторюється.

На третьому етапі прихована вершина додається до мережі. Якщо ця вершина вставляється між кількома існуючими вузлами, попередні дуги між ними видаляються, а нові дуги з'єднуються з прихованим вузлом. Щоб додати приховану батьківську вершину, просто створюється вершина та відповідна дуга.

На наступному етапі початковими значеннями ініціалізуються параметри прихованих вершин. Значення можуть бути запропоновані експертами або створені випадково.

На останньому етапі запускається ітераційний процес алгоритму ЕМ за допомогою попередньо створеної вибірки даних. Це призводить до оцінки невідомих параметрів прихованих вершин мереж Байеса.

2.6 Висновки до розділу

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Мережі Байєса – ймовірнісний інструментарій для математичного моделювання ієрархічних процесів, що мають складну та невизначену природу. БМ представляються у вигляді ациклічного направленого графа та містять ймовірнісні розподіли вершин у вигляді таблиць умовних ймовірностей. В останні роки БМ не дарма стрімко розвивались в наукових дослідженнях, адже вони мають ряд переваг для інтелектуального аналізу даних. Серед цих переваг варто виділити відображення причинно-наслідкових зв'язків, ймовірнісну семантику, а також можливість моделювання при відсутності частини даних або наявності прихованих вершин.

2. БМ є досить зручним інструментом для вирішення прикладних задач користувачів завдяки вдалому представленню у вигляді графів. БМ забезпечують успіх у виконанні практичних завдань завдяки фундаментальним положенням і результатам теорії ймовірностей Вони, зокрема, важливі для розробки та аналізу алгоритмів машинного навчання та є ефективним інструментом для вирішення проблем невизначеності та опису складних процесів.

3. Побудова мереж Байєса на основі навчальних даних є важливою метою дослідження. Розв'язання задач пошуку оптимальної структури БМ, тобто направленого ациклічного графа, який найкраще відповідає навчальним даним, а також обчислення значень таблиць умовних ймовірностей БМ для кожної вершини цього графа, є двома основними компонентами побудови баєсової мережі.

4. БМ мають усі характеристики, необхідні для успішного використання в цілях технічної діагностики верстатів на основі інтелектуального аналізу даних.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВЕРСТАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЄСОВИХ МЕРЕЖ

3.1 Структура системи технічної діагностики верстату

Структурна схема системи технічної діагностики верстату (СТДВ) зображена на рис. 3.1. Система складається з трьох основних підсистем і має блочно-модульну архітектуру.

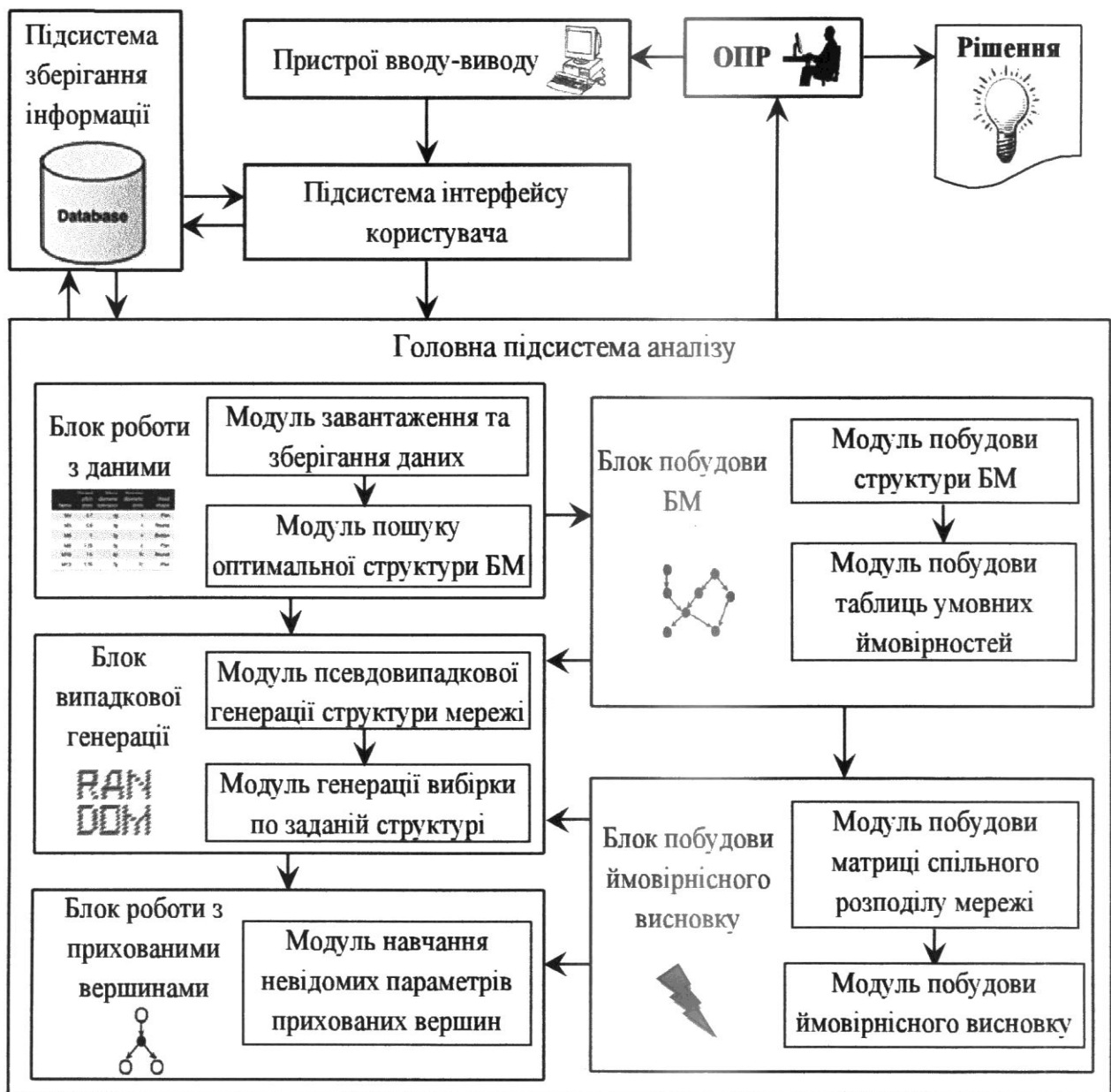


Рис. 3.1 - Архітектура системи технічної діагностики

Пристрої вводу-виводу дозволяють користувачеві завантажувати дані для побудови БМ та для навчання параметрів прихованих вершин, а також зберігати результати роботи в зовнішні файли.

Підсистема інтерфейсу користувача пов'язує користувача, внутрішні елементи СППР, зовнішні запам'ятовуючі пристрої та пристрої вводу-виводу. Інтерфейс надає можливість користувачеві завантажувати дані, вводити команди і запити в систему, отримувати графічне представлення даних і результатів і зберігати отримані результати.

Підсистема зберігання інформації складається із загальної бази даних, бази моделей та бази знань, які призначені для накопичення навчальних даних, готових моделей на основі БМ.

Головна підсистема аналізу система призначена для аналізу даних на основі БМ, тобто побудова БМ та ймовірнісного висновку, генерація вибірки по заданій структурі мережі та навчання параметрів прихованих вершин.

Головна підсистема аналізу складається з п'яти блоків: (1) блок роботи з даними; (2) блок побудови БМ; (3) блок побудови ймовірнісного висновку; (4) блок випадкової генерації; (5) блок роботи з прихованими вершинами.

Дані до цієї підсистеми надходять від підсистеми зберігання інформації по шині даних.

Блок роботи з даними призначений для пошуку оптимальної структури мережі Байєса, завантаження даних для побудови БМ, а також зберігання даних, отриманих як результат генерування вибірки. Даний блок складається з наступних модулів: (1) модуль завантаження та зберігання даних; (2) модуль пошуку оптимальної структури БМ.

Модуль завантаження та зберігання даних призначений для завантаження даних з файлу та вивантаження згенерованих даних.

Модуль пошуку оптимальної структури БМ використовує евристичний алгоритм побудови БМ для знаходження топології мережі з можливістю вибору способу обчислення взаємозв'язку між вершинами серед наступних: значення взаємної інформації, коефіцієнти Пірсона, Крамера, Чупрова і лямбда Гудмана.

Блок побудови байєсових мереж дає можливість будувати БМ «вручну», використовуючи графічний інтерфейс. Блок складається з таких модулів: (1) модуль побудови структури БМ; (2) модуль побудови таблиць умовних ймовірностей.

Модуль побудови структури БМ реалізує інструменти для побудови БМ «вручну» і дає можливість будувати та видаляти вершини, зв'язки між ними, відображати чи приховувати імена вершин та очищати поле побудови.

Модуль побудови таблиць умовних ймовірностей дозволяє редагувати ім'я вершини, змінювати стани вершин, додавати, видаляти, перейменовувати їх та заповнювати таблиці умовних ймовірностей.

Блок побудови ймовірнісного висновку призначений для побудови ймовірнісного висновку по структурі БМ, що надходить з блоку побудови структури БМ. Блок складається з наступних модулів: 1) модуль побудови матриці спільного розподілу; 2) модуль побудови ймовірнісного висновку.

Модуль побудови матриці спільного розподілу призначений для побудови матриці емпіричних значень сумісного розподілу ймовірностей всієї мережі Байєса.

Модуль побудови ймовірнісного висновку здійснює ймовірнісний висновок в мережі на основі матриці емпіричних значень сумісного розподілу ймовірностей.

Блок випадкової генерації призначений для псевдовипадкової генерації структури мережі по заданим параметрам та вибірці по заданій структурі. До складу блоку входять такі модулі: (1) модуль псевдовипадкової генерації структури мережі; (2) модуль генерації вибірки по заданій структурі.

Модуль псевдовипадкової генерації структури мережі. Для того, щоб виключити всячі вершини першим етапом було поєднання всіх вершин у ланцюг. При цьому напрямок зв'язку обирається випадковим чином. Кількість зв'язків побудованих таким чином $N - 1$. $M - N + 1$ зв'язків, що залишилися, будуються шляхом вибору випадковим чином батьківської та дочірньої вершин. При додаванні зв'язку здійснюється перевірка на циклічність. Якщо новий зв'язок

утворює цикл, то він відкидається і обирається нові батьківська і дочірня вершини.

Таблиці умовних ймовірностей задаються шляхом заповнення їх випадковими числами в діапазоні від 0 до 1 із наступною нормалізацією (зведення суми ймовірностей по рядку до 1).

Модуль генерації вибірки по заданій структурі. Генерація вибірки відбувається способом, описаним в підрозділі 3.6. Тобто спочатку робиться ймовірнісний висновок у мережі без інстанційованих вершин. Далі по черзі інстанціюються стани кожної вершини, які утворюють необхідну кількість записів у вибірці.

Блок роботи з прихованими вершинами складається з одного модуля навчання невідомих параметрів прихованих вершин і призначений для ітераційного знаходження параметрів мережі з використанням ЕМ-алгоритму (підрозділ 3.3.2) по критерію логарифмічної функції правдоподібності.

3.2 Програмна реалізація системи технічної діагностики верстату

На основі розробленої оригінальної архітектури СТДВ була реалізована комп'ютерна процедура в програмі VNetMaster [5] аналізу даних з використанням мереж Байеса. Для реалізації використовувалась мова високого рівня Delphi 7, яка є об'єктно-орієнтованим інструментом програмування, що дозволяє представити розроблені алгоритми у вигляді ієрархії класів з наслідуванням властивостей та методів. Це дає можливість отримати ефективний та надійний програмний продукт, гнучку систему для подальших досліджень.

Системні вимоги. Для нормального функціонування програми необхідна ЕОМ з наступними характеристиками:

- процесор з тактовою частотою не менше 500 МГц;
- вільний дисковий простір: 20 Мбайт і більше для програмних модулів системи, навчальних даних і формування баз даних (останнє значення не фіксоване і може змінюватися в процесі експлуатації);
- оперативна пам'ять 256 Мбайт і більше;
- операційна система Windows 2000/XP/Vista/Seven;

- пристрій безперебійного живлення ЕОМ для можливості автономної роботи програми;
- клавіатура та комп'ютерна миша;
- пристрій для запису даних і результатів на оптичні носії.

Програма BNetMaster надає такі основні можливості: 1) будувати структуру мережі Байєса; 2) формувати ймовірнісний висновок; 3) генерувати вибірку та структуру мережі; 4) знаходити невідомі параметри БМ з прихованими вершинами.

3.3 Побудова мережі Байєса

3.3.1 Побудова мережі по завантаженим даним

Програма BNetMaster призначена для роботи з файлами Excel. Для того щоб програмі вказати ім'я файлу з даними, необхідно вибрати опцію «Дані» → «Завантажити дані» в головному меню (рис. 3.2).

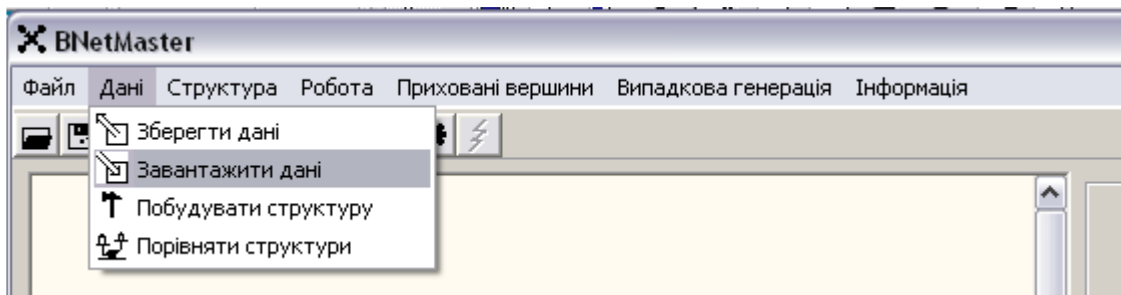


Рис. 3.2 Завантаження даних з файлу

Після цього у вікні завантаження даних (рис. 3.3) натиснути кнопку «Завантажити» та вказати файл з даними.

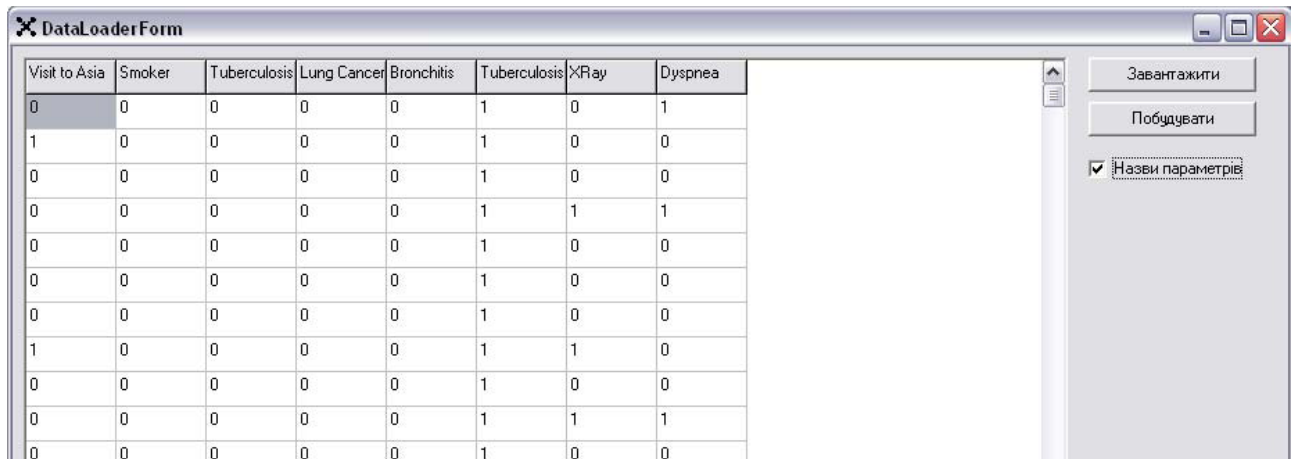


Рис. 3.3 - Вікно завантаження даних

Якщо перший рядок файлу містить імена вершин, то необхідно поставити відповідну відмітку. У стовпцях таблиці – майбутні вершини БМ.

Рядки таблиці – це навчальні записи.

Для побудови мережі Байєса за навчальними даними необхідно натиснути кнопку «Побудувати» у вікні завантаження даних (див. рис. 3.3) або вибрати пункт головного меню «Дані» → «Побудувати структуру» (див. рис. 3.2) після того, як дані були завантажені.

Далі з'явиться вікно для вибору методу оцінки взаємозв'язку між вершинами (рис. 3.4).

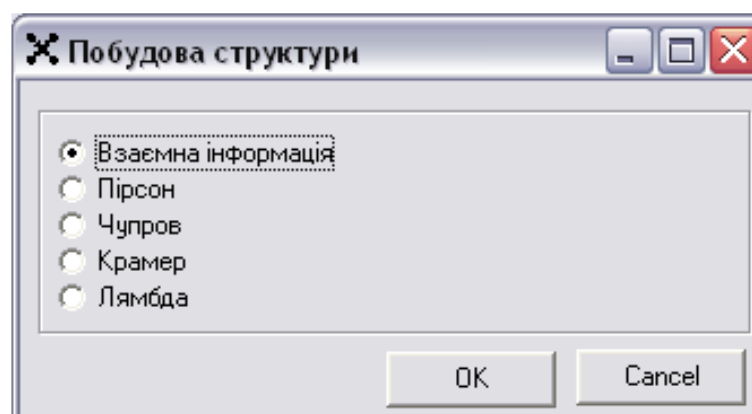


Рис. 3.4 - Типи оцінювання взаємозв'язків між вершинами при побудові мереж Байєса

В програмі реалізовані наступні методи [6]:

– значення взаємної інформації;

- коефіцієнт Пірсона;
- коефіцієнт Чупрова;
- коефіцієнт Крамера;
- коефіцієнт лямбда Гудмана.

Після вибору необхідного методу треба натиснути кнопку «ОК». Програма виконає побудову матриці взаємних значень факторів, а потім за алгоритмом евристичного методу побудує структуру БМ і відобразить її в графічній області (рис. 3.5).

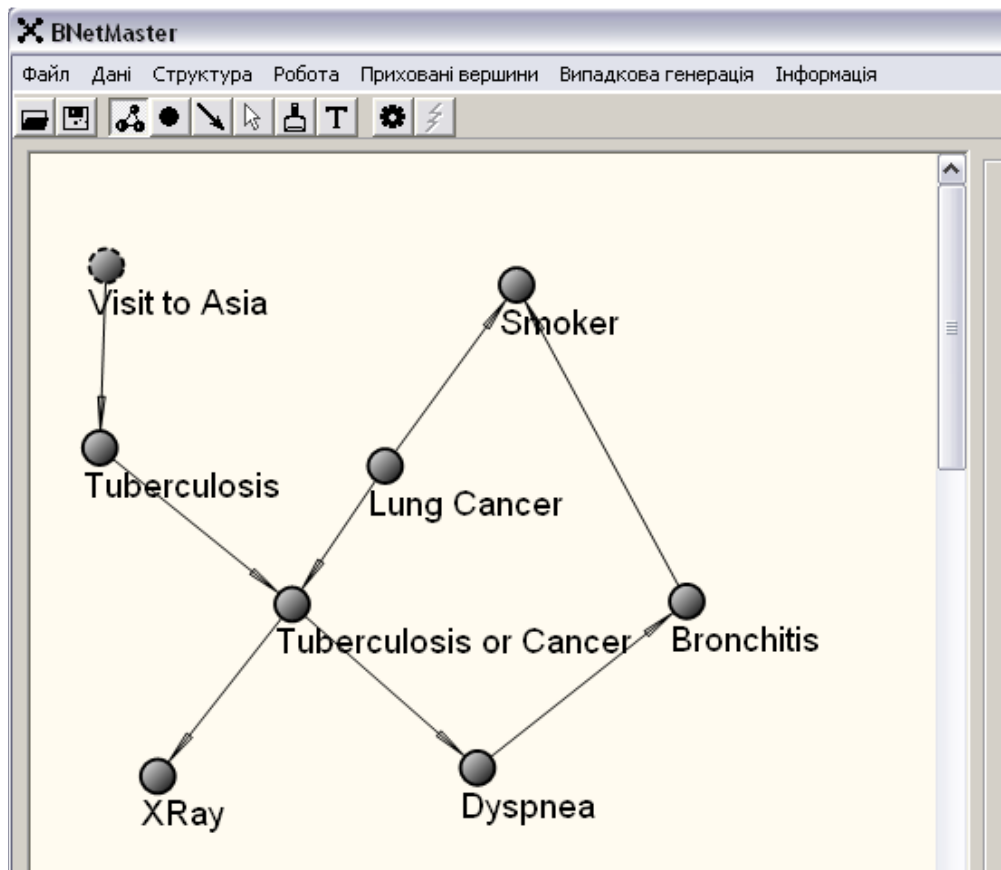


Рис. 3.5 - Графічне відображення побудованої БМ

3.3.2 Побудова мережі в «ручному» режимі

Побудова структури мережі відбувається за допомогою пункту головного меню «Структура» (рис. 3.6) або за допомогою відповідних кнопок на головній панелі інструментів (рис. 3.7).

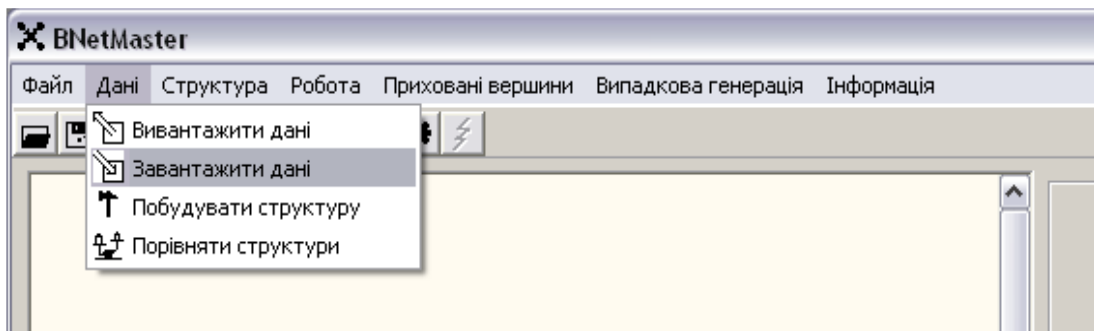


Рис. 3.6 - Побудова топології мережі «вручну»



Рис. 3.7 - Панель інструментів для побудови БМ

Призначення інструментів для побудови байєсових описано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Призначення інструментів для побудови БМ

Інструмент	Назва	Призначення
	Режим побудови структури мережі	Використовується для переходу в режим побудови структури мережі. Стають активними інструменти, за допомогою яких можна побудувати БМ.
	Додати вершину	Перехід в режим додавання вершин. Вершини додаються за допомогою лівої кнопки миші на робочій області.
	Додати зв'язок	Перехід в режим додавання зв'язків. Зв'язок додається шляхом вибору лівою кнопкою миші батьківської вершини, а потім дочірньої.
	Вибір	Перехід в режим вибору. В даному режимі можливо перетягувати вершини, а також видаляти за допомогою клавіші Del.
	Очистити	Видаляє всі елементи мережі, побудовані на даний момент.
	Відобразити / приховати написи	Відображає/приховує імена вершин.

Редагування властивостей вершин. Для переходу до вікна редагування властивостей вершини необхідно зробити подвійний клік лівою кнопкою миші на вершині (рис. 3.8).

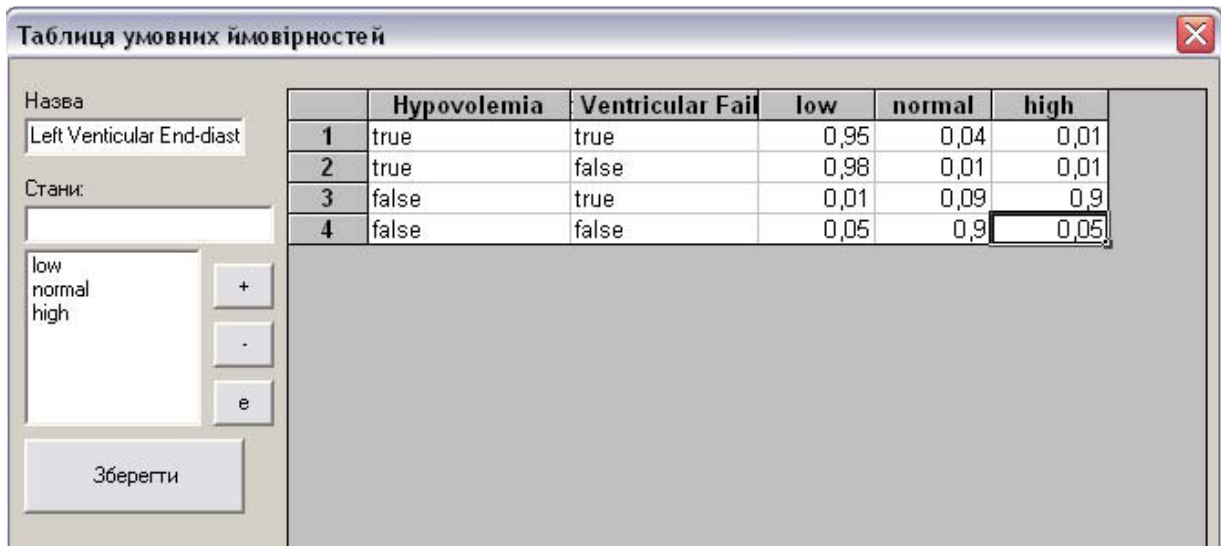


Рис. 3.8 - Редагування вершин

Можливі наступні дії:

- зміна назви вершини (лише латиниця)
- «+» додати новий стан (якщо ім'я стану не є пустим)
- «-» видалити вибраний стан
- «e» змінити назву вибраного стану (необхідно вибрати стан, ввести нове ім'я і натиснути кнопку «e»)
- задати таблицю умовних ймовірностей
- зберегти зміни

Всі зміни набувають чинності лише після збереження таблиці умовних ймовірностей (ТУЙ). При цьому нормуються значення в таблиці умовних ймовірностей так, щоб в рядку сума чисел дорівнювала одиниці. Наприклад, до збереження ТУЙ значення умовних ймовірностей нащадка для одного набору станів предків мали значення 1 і 3. Відповідна таблиця зображена на рис. 3.9.

	A	B	s1	s2
1	s1	s1	0,5	0,5
2	s1	s2	0,5	0,5
3	s2	s1	1	3
4	s2	s2	0,5	0,5

Рис. 3.9 - Значення умовних ймовірностей до збереження ТУЙ

Після збереження ТУЙ отримаємо нормовані значення умовних ймовірностей (рис. 3.10). Якщо в рядку всі значення дорівнюють нулю, то рядок заповнюється рівномірно.

	A	B	s1	s2
1	s1	s1	0,5	0,5
2	s1	s2	0,5	0,5
3	s2	s1	0,25	0,75
4	s2	s2	0,5	0,5

Рис. 3.10 - Значення умовних ймовірностей після збереження ТУЙ

3.3.3 Ймовірнісний вивід

Для переходу до режиму ймовірнісного виводу необхідно обрати пункт головного меню «Робота» → «Перейти» (рис. 3.11) або натиснути на відповідну кнопку панелі інструментів. Відразу після переходу до цього режиму буде здійснено ймовірнісний вивід.

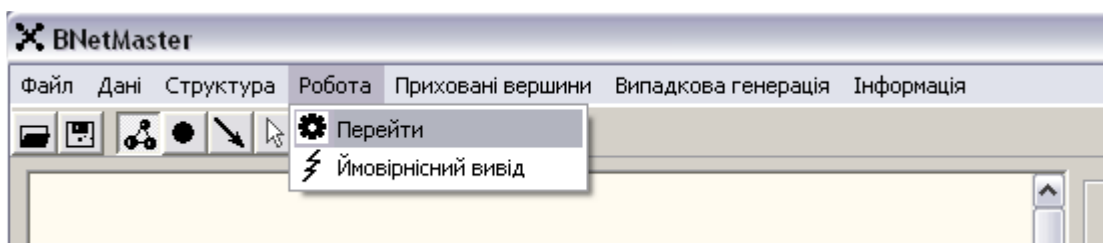


Рис. 3.11 - Режим ймовірнісного висновку

Для того щоб подивитись ймовірність станів вершини користувач повинен натиснути правою клавішею миші на вершині. В області ймовірнісного виводу, що знаходить в правій частині головного вікна, з'явиться таблиця з іменем вершини, станами та їх ймовірністю. Для того щоб прибрати таблицю необхідно натиснути на таблицю правою клавішею миші.

Node 1			
N ²	State	Prob	Bar
1	true	0,33333...	█
2	false	0,66666...	█

Рис. 3.12 - Відображення ймовірностей станів вершини

Якщо подвійно натиснути лівою клавішею миші на імені стану, то він стане інстанціонованим (рис. 3.13), тобто його ймовірність стане дорівнювати одиниці,

а ймовірності станів інших вершин будуть перераховані у відповідності зі змінами.

Nº	State	Prob	Bar
1	<i>True</i>	1	
2	False	0	

Рис. 3.13 - Інстанціювання вершини

Вершини із інстанційованими станами мають червоне забарвлення у графічній області структури мережі (рис. 3.14).



Рис. 3.14 - Інстанційована вершина

Якщо користувач перейде до режиму редагування структури мережі, то інстанціювання знімається з усіх станів. Після редагування параметрів вершини (зміна таблиці умовних ймовірностей, станів, тощо) ймовірності станів не будуть перераховані автоматично. Для перерахунку користувачу необхідно натиснути на кнопку «Ймовірнісний вивід» (рис. 3.15) на панелі інструментів або вибрати пункт головного меню «Робота» → «Вивід».



Рис. 3.15 - Кнопка ймовірнісного виводу

3.3.4 Формування вибірки по заданій мережі

Користувач може згенерувати вибірку на основі побудованої мережі. Для цього йому необхідно обрати пункт меню «Дані» → «Зберегти дані» (див. рис. 3.2). У відповідь з'явиться вікно генерації (рис. 3.16), в якому необхідно задати розмір вибірки та натиснути кнопку «Генерація». Після цього у таблиці з'являться сформована вибірка даних поточної структури мережі.

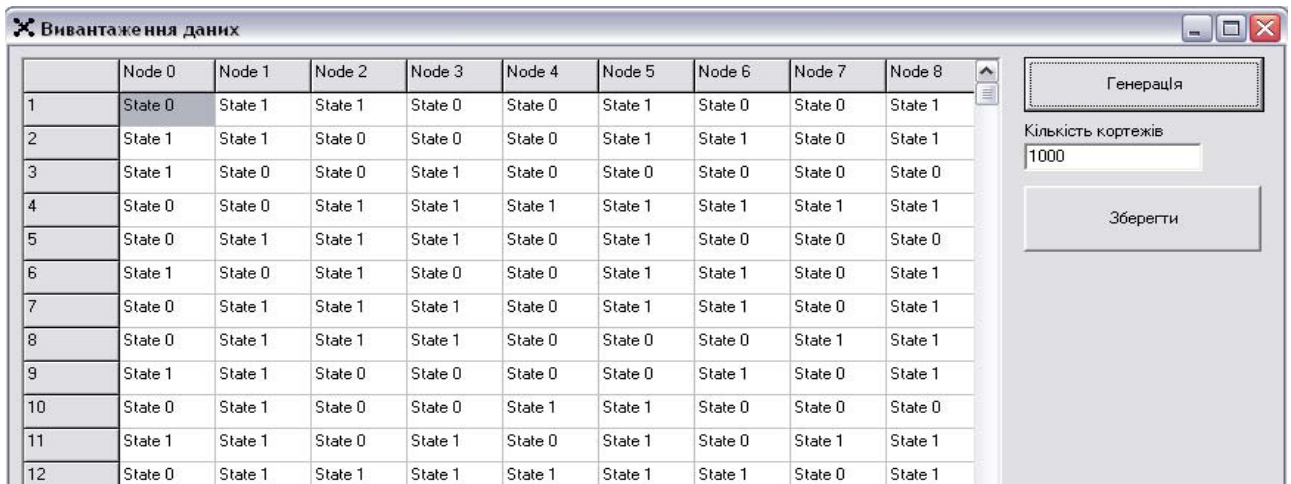


Рис. 3.16 - Формування вибірки даних

Для того щоб зберегти дані на диску необхідно натиснути на кнопку «Зберегти» та обрати місцезнаходження файлу. Після цього сформовані дані з назвами вершин будуть збереженні у форматі *.xls.

3.3.5 Порівняння мереж за структурою

Для порівняння мереж за структурою необхідно обрати пункт головного меню «Дані» → «Порівняти структури» (див. рис. 3.2). У вікні, що з'явиться, необхідно натиснути кнопки «Завантажити» і вказати шлях до першої і другої мережі (рис. 3.17).

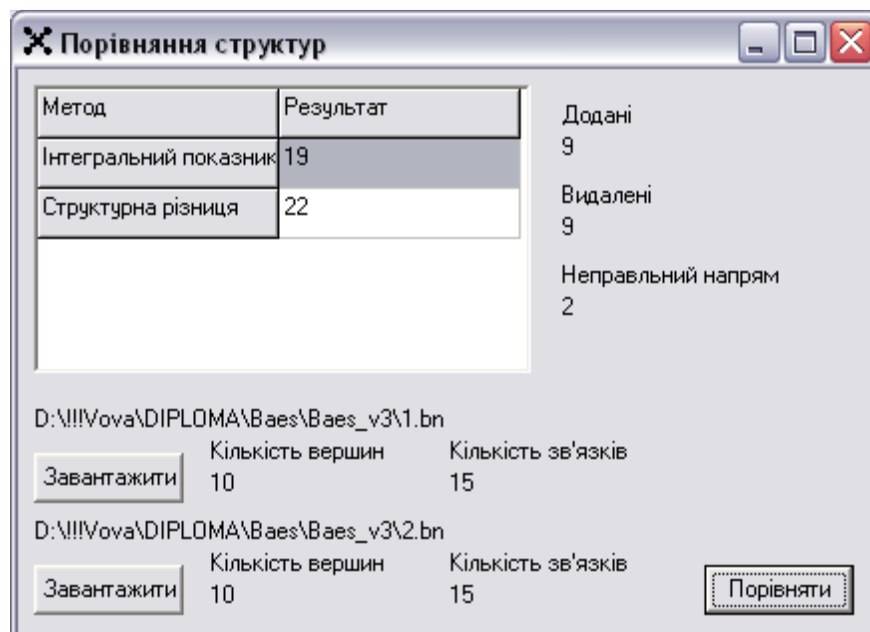


Рис. 3.17 - Порівняння структур БМ

Після того як буде натиснута кнопка «Порівняти» програма обчислить кількість доданих, видалених зв'язків та зв'язків із зміненним напрямком. У

таблиці будуть виведенні показники структурної різниці та інтегрального показника. Необхідною вимогою для порівняння мереж є однакова кількість вершин.

3.3.6 Знаходження параметрів мереж Байєса з прихованими змінними

Система BNetMaster дає можливість знаходити параметри БМ, що містять приховані вершини. Знаходження невідомих параметрів є послідовним процесом, що складається з наступних пунктів:

- побудова БМ (підрозділ 3.3.1);
- генерація вибірки за побудованою БМ (підрозділ 3.3.2);
- введення прихованої вершини;
- виконання ітерацій EM-алгоритму необхідно вибрати пункт «Приховані вершини» → «EM алгоритм» головного меню (рис. 3.18).

При цьому початкові параметри задаються випадковим чином.

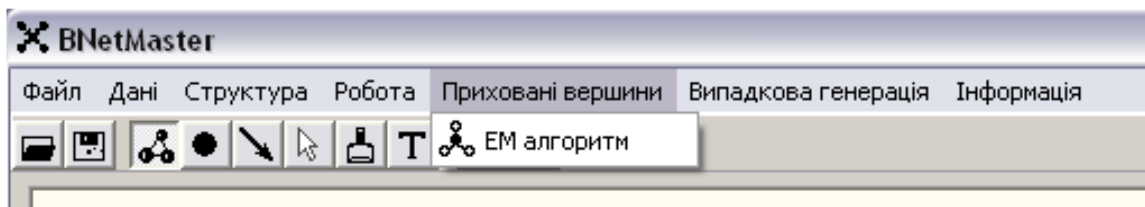


Рис. 3.18 - Знаходження параметрів прихованих вершин

Після виконання EM - алгоритму таблиці умовних ймовірностей будуть змінені таким чином, щоб отримана мережа максимально правдоподібно відповідала згенерованим даним.

3.4 Висновки до розділу

В даному розділі описано архітектуру СТДВ на базі BNetMaster, розробленої для аналізу даних на основі байєсових мереж.

Система BNetMaster відрізняється застосуванням об'єктно-орієнтованого підходу і має гнучку архітектуру, що є важливим фактором для застосування її в СТДВ.

Розроблені та реалізовані методи побудови моделей діагностики для ймовірнісного висновку, генерації вибірки та навчання параметрів прихованих

вершин призначені для автоматичного аналізу процесів за даними, що їх описують.

Експерти не приймають участь у побудові моделей, окрім випадку наявності прихованих змінних, оскільки саме вони визначають структуру мережі в цьому випадку, кількість станів прихованих вершин, а також можуть приймати участь в вихідній ініціалізації параметрів прихованих вершин на початковому етапі їх навчання.

СТДВ на базі BNetMaster задовольняє основним характеристикам систем технічної діагностики, тобто вона використовує моделі і дані у вигляді БМ; призначена для допомоги ОПР при прийнятті рішень для структурованих та слабоструктурованих задач; підтримує рішення, що приймаються ОПР, а не замінює їх та використовується з метою підвищення якості та ефективності рішень.

Виконано опис структури розробленої програми, основних можливостей та представлено інструкцію щодо використання BNetMaster для побудови моделей у вигляді БМ.

Отримані результати свідчать про ефективність розробленого програмного продукту для розв'язання задач інтелектуального аналізу даних, зокрема для аналізу слабо структурованих проблем в технічній діагностиці

4 ВІБРОДІАГНОСТИКА ШПИНДЕЛЬНОЇ ГРУПИ ВЕРСТАТА МОД. 16М05А

4.1 Опис об'єкту діагностування

Верстат мод. 16М05А – токарний, патронно-центровий особливо високій точності (рис. 4.1) призначений для виконання різних токарних робіт високої точності, що виконуються в центрах, цанзі, патроні і планшайбі, а також для нарізання метричних, дюймових і модульних різьб.



Рис. 4.1 - Верстат мод. 16М05А токарний, патронно-центрної особливо високої точності

Верстат мод. 16М05А забезпечує якість оброблюваної поверхні і точності роботи (точність розмірів і геометричних форм) високого класу.

Область застосування верстата – підприємства приладобудівної, радіотехнічної, інструментальної промисловості і точного машинобудування.

Виготівник - Одеський верстатобудівний завод.

4.1.1 Основні технічні характеристики

Найбільший діаметр деталі оброблюваною над станиною, мм	250;
Найбільший діаметр деталі оброблюваною над супортом, мм	139;

Найбільша довжина оброблюваної деталі, мм 500;

Точність А;

Потужність, кВт 1,5;

Габарити, мм 1530x910x1385;

Маса, кг 1140.

Межі діаметрів встановлюваних заготовок, мм:

1. у цанзі:

- найменший 4;

- найбільший 28

2. у патроні:

- найменший 5;

- найбільший 160;

3. у люнеті:

- найменший 5;

- найбільший 50;

Діаметр крізного отвору в шпинделі не менше, мм 32.

Умовний розмір фланцевого кінця шпинделя по ГОСТ 12593-72 4К.

Найбільше подовжнє переміщення супорта, мм - 520.

Найбільше поперечне переміщення супорта, мм - 160.

Найбільше переміщення різцевих санчат, мм - 150.

Найбільший кут повороту різцевих санчат, градус + - 45.

Ціна одного ділення лімба подовжнього переміщення супорта, мм 0,1.

Ціна одного ділення лімба поперечного переміщення супорта, мм 0,02.

Ціна одного ділення шкали повороту різцеутримувач, градус 1.

Межі частот обертання шпинделі, об/хв - (безступінчасте) 25...250 .

Граничні значення кроків оброблюваних резьб, мм:

- метричні, мм 0,2.28;

- модульних, модуль 0,1.14;

- дюймових, нитки на дюйм - 96.5.

Найбільший крутний момент на шпинделі (25.90 об/хв), Н·м - 120.

Потужність приводу головного руху, Квт 1,5.

Сумарна потужність встановлюваних електродвигунів, Квт 3,825.

Показники точності і шорсткості обробки зразків, мкм:

- кругла 1,2;
- шорсткість Ra при обробці кольорових металів 0,04;
- шорсткість Ra при обробці стали 0,63.

Примітка: Допускається коливання частоти обертання шпинделя $\pm 8\%$ від номінального.

4.1.2 Показники надійності

Встановлене безвідмовне напрацювання в добу, ч випуску: до - 21.

Встановлене безвідмовне напрацювання в тиждень, ч -126.

Встановлене безвідмовне напрацювання, ч -1500.

Термін придатності до першого капітального ремонту, років 10.

Коефіцієнт технічного використання - 0,91.

Середній час відновлення, ч – 8.

Рівень звуку на робочому місці, Дба – 77.

Коректований рівень звукової потужності, Дба 91

Характеристика потужності головного руху обмежена слабкими ланками.

4.1.3 Привід головного руху

Кінематика верстата дозволяє здійснювати наступні основні рухи (рис.4.2):

- обертання шпинделя - привід головного руху
- переміщення різця - привід резьб і нормальних подач, привід тонких подач.

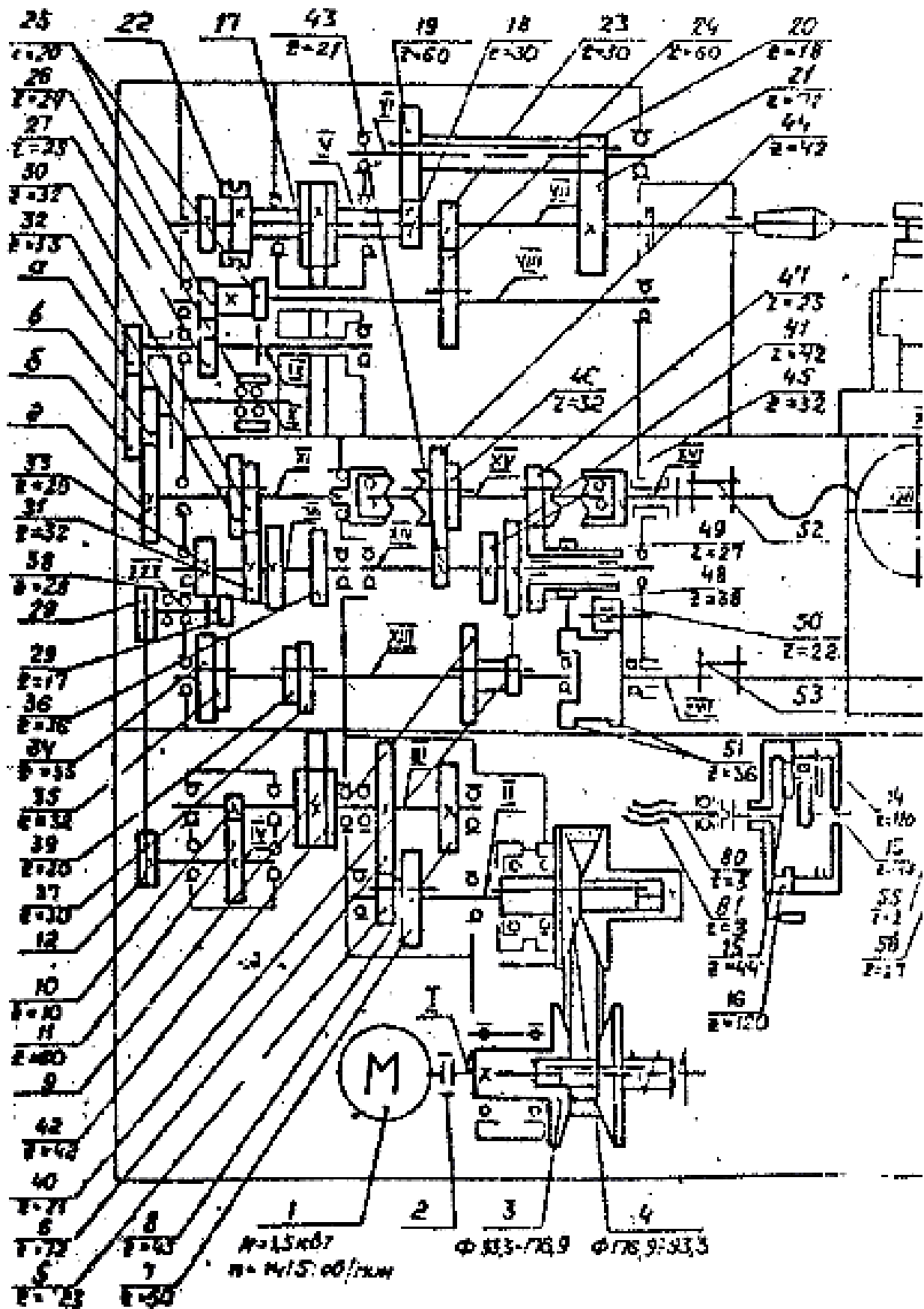


Рис. 4.2 - Схема кінематична

Електродвигун 1 за допомогою муфти 2 обертає вал 1 з ведучим шківом варіатора 3. Обертання про т провідного шківа веденому 4 передається широким клиновим ременем. Зміна частоти обертання веденого валу II забезпечується зміною робочих діаметрів шківів варіатора при переміщенні керованої частини веденого шківа і відповідного переміщення підпружної частини провідного шківа.

Обертання валу III, шківу 9 передається за допомогою зубчатого блоку 5, 7 і зубчатих коліс 6, 8. Шків 9 сполучений з шківом 17 клиновими ременями. Обертання від втулки V передається шпинделю VII або безпосередньо при включенні муфти 22, або через перебір що складається із зубчатого колеса 18, сполученого з втулкою V зубчатих коліс 19, 20, встановлених на валу VI, зубчатого колеса 21, встановленого на шпинделі.

4.1.4 Бабка передня

У корпусі передньої бабці (рис. 4.3) зібрані шпиндель, перебір, привід резьб і подач з трензелем і механізм управління. Приймальний шків 8 передньої бабці встановлений на шестерне- втулці 11 співвісною з шпинделем 4. Зліва від шківа розташована муфта 10 прямого включення шпинделя, справа - зубчатого колеса, перебору 2, 6,7,11.

Шпиндель верстата обертається в підшипниках кочення, передня опора сприймає радіальні і осьові навантаження, задня - радіальні.

Задня опора шпинделя і ліва опора шестерні-втулки 11 шківа 8 розташовані в стакані 9. При заміні приводних пасів цей стакан потрібно знімати.

Передавальне відношення перебору передньої бабці рівне $1/8$. Управління перебором 6,7 і муфтою 10 прямого включення здійснюється однією рукояткою. Поряд з шестернею-втулкою 11 на шпинделі 4 розташовано зубчате колесо 3 приводи резьб і подач. Зубчате колесо 1, розташоване на першому валу 12 приводу резьб і подач, може з'єднуватися або із зубчатим колесом перебору 11, або із зубчатим колесом 5, що сидить на шпинделі, що дає можливість при включеному переборі отримати збільшення кроку різьб.

Зміна напрямку нормальної подачі або нарізуваного різьблення здійснюється трензелем, що складається з подвійного зубчатого колеса 13, ковзаючого колеса

15 і паразитного колеса 16. Колесо 15 посаджено на шліці вихідного валу 14, на кінець якого надягає одне із змінних коліс гітари.

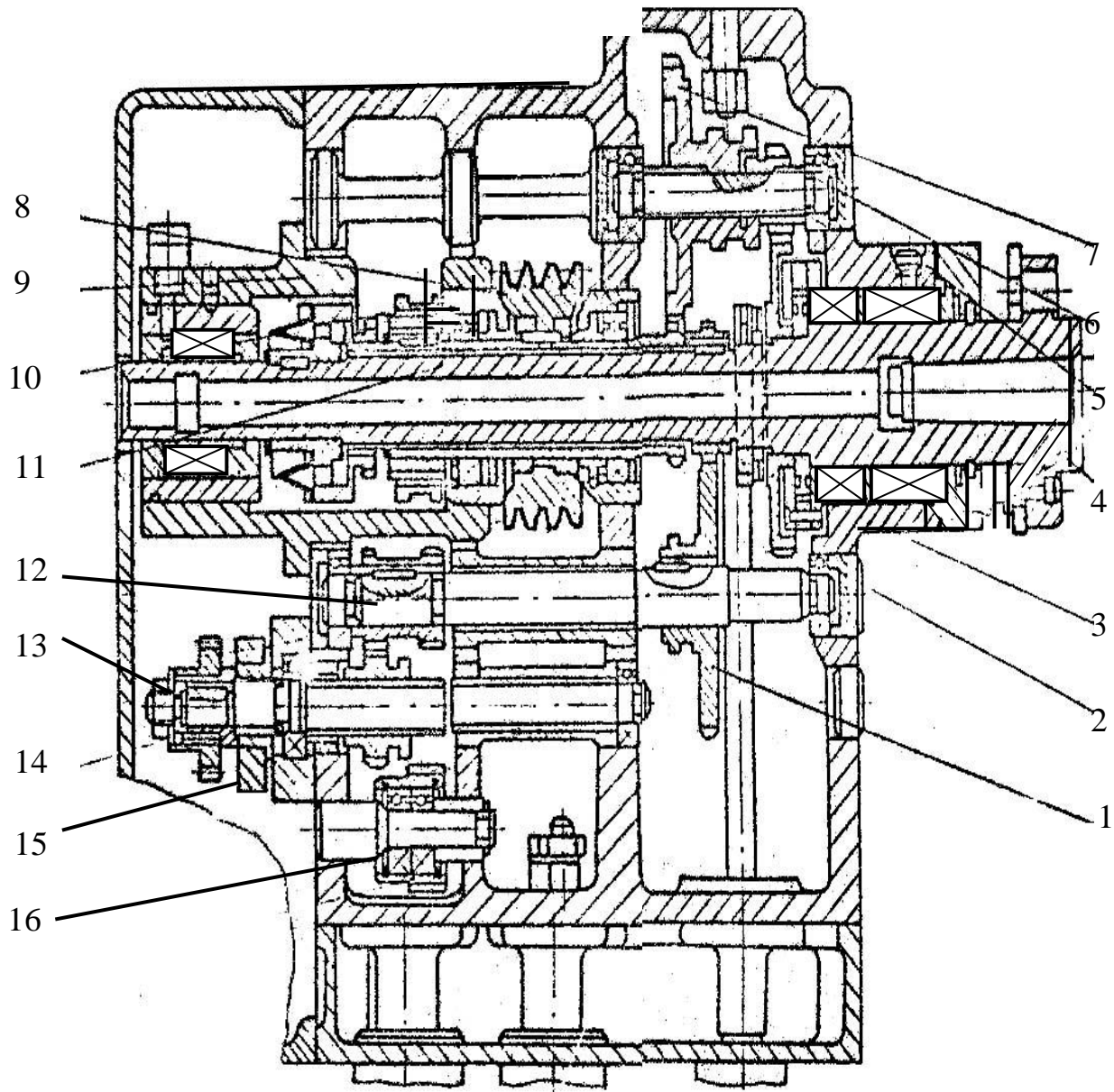


Рис. 4.3 - Передня бабка верстата

4.1.5 Шпиндельний вузол

Розглядається варіант встановлення шпинделя на підшипниках кочення (рис. 4.4) з передачею обертів через перебір (див п. 4.1.3 і рис. 4.2) .

Джерелами вібрацій шпинделя є: нерівномірність тіл кочення і нерівність доріжок кочення підшипників 1 – 3; незбалансованість шпинделя 4 з патроном і заготівкою і неспіввісність його установочних баз; привод 5.

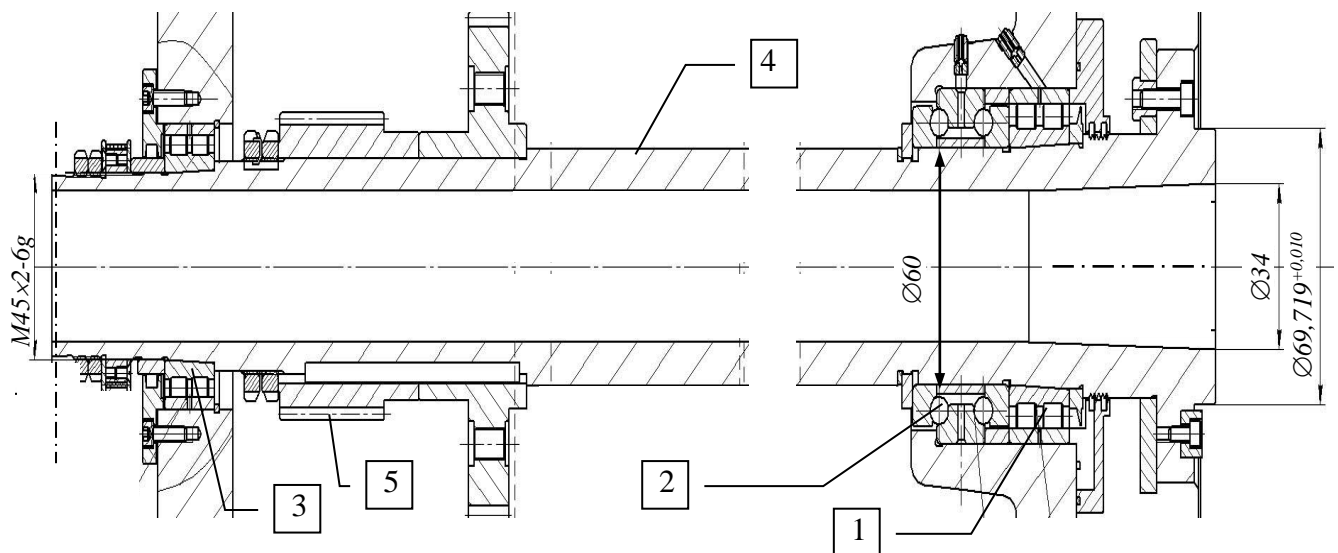


Рис. 4.4 - Шпиндель верстата на підшипниках кочення; позиціями 1 показані джерела вібрацій шпинделя

В передній опорі встановлені:

1. Підшипник 3182112 роликовий радіальний з короткими циліндричними роликами двохрядний з конічним отвором по ГОСТ 7834-75, $d = 60$ мм;
2. Підшипник 178812 упорно-радіальний кульковий двохрядний з кутом контакту 60° , по ГОСТ 20821-75, $d = 60$ мм.

В передньої опорі встановлені підшипник 3182109 роликовий радіальний з короткими циліндричними роликами двохрядний з конічним отвором по ГОСТ 7834-75, $d = 45$ мм.

4.1. Розробка моделі діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні

4.2.1 Встановлення зв'язків погрішностей форми з параметрами шпиндельної групи

Погрішність форми у поперечному перерізі деталі виражається в параметрах огранки, некруглості і шорсткості. Причинами цих відхилень від ідеальної окружності є відносні вібрації шпинделя з заготівкою і інструменту (різця) зі супортною групою. Напрямок вібрацій – перпендикулярний до осі обертання шпинделя. Отже діагностичними ознаками будуть відхилення форми

від ідеальної окружності у поперечному перерізі деталі.

При цьому внутрішніми джерелами погрешностей шпиндельної групи є вказані на рис. 4.3 елементи: дефект сепараторів, нерівність доріжок кочення підшипників і нерівномірність тіл кочення 1 – 3 (separat_1, paths_2, rollers_3); незбалансованість шпинделя 4 з патроном і заготовкою і неспіввісність його установочних баз (spindle_4).

Зовнішні джерела: привод шпинделя (drive_5) і супорт з інструментом (support_6).

На рис. 4.4 схематично показані ці зв'язки.

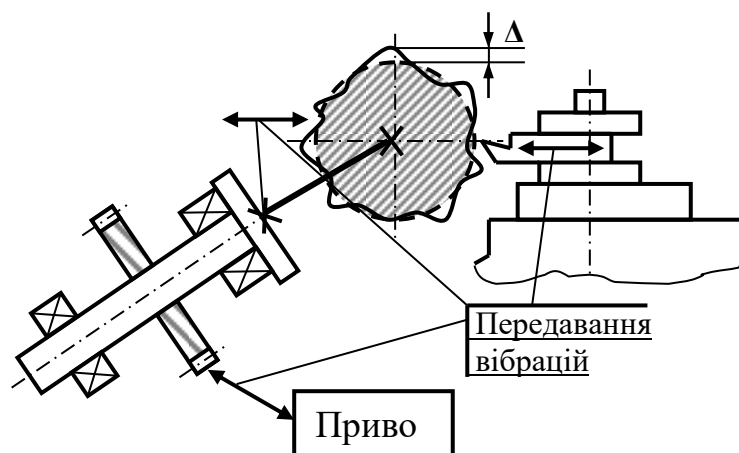


Рис. 4.4 - Схема впливу елементів технологічної системи верстата на погрешність форми у поперечному перерізі при точінні

Таким чином, маємо 6 параметрів для діагностування і кілька діагностичних ознак (симптомів), які будуть розглянуті далі.

4.2.2 Встановлення діагностичних ознак погрешностей форми

При вібродіагностиці основної інформацією є запис кривої зміщень у часі відносно якоїсь бази. Зручним методом, який напряду дозволяє судити про якість обробки, є виробничий метод, при якому обточують пробний валик при встановлених режимах різання.

Для контролю відхилень форми у поперечному перерізі знімають профілограму, або виконують заміри відхилень на верстаті мікрометром за схемою на рис. 4.5. Мікрометр попередньо виставляється на 0 по еталонному

зразку. При вимірах оброблений валик повертається на крок $\Delta\varphi = 2\pi/n = \text{const}$. Після кожного оберту супорт з мікрометром зміщується на крок ΔS , повздовж осі шпинделя. В кожній точці вимірів фіксується показ мікрометра.

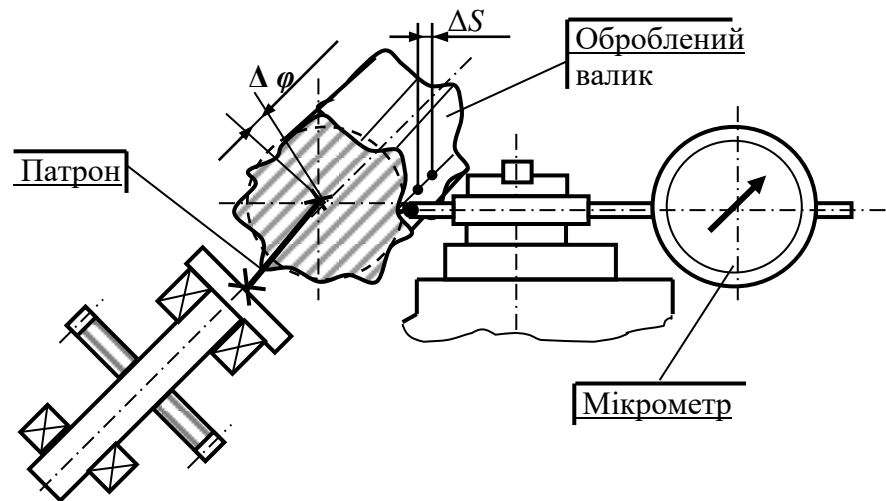


Рис. 4.5. - Схема замірів відхилень на верстаті мікрометром

Число точок n на оберт при вимірах дорівнювало $n=12$, тобто $\Delta\varphi = \pi/6 = 30^\circ$. Крок дорівнює величині подачі на 1 оберт, $\Delta S = S_{об}$. Для того, щоб отримати стаціонарний і статистично значимий ряд число обертів обиралося $m = 10$. Таким чином загальне число точок вимірів $N = m \cdot n = 120$.

Попередньо виконується вимір валика, що обточений на точному верстаті. Цій запис є еталонним зразком, відносно якого буде виконуватися діагностика шпиндельної групи.

Для діагностики зручно використовувати не криву відхилень, її інтегровану характеристику – дискретний спектр Фур'є.

4.3. Частотний аналіз биття шпинделів і встановлення діагностичних ознак

4.3.1 Методика проведення аналізу

Точність обертання шпинделів, наряду із твердістю, стабільністю температури та динамічними характеристиками шпиндельного вузла, визначає великою мірою точність та продуктивність всього верстата. Факторами виникнення биття шпинделя, що центрується, та биття осі обертання шпинделів, є ексцентриситет поверхні шийки шпинделя та отвору підшипника, некруглість та хвилястість поверхні шийки, бічне биття по поверхні шийки та інші фактори.

Визначення биття шпинделя включає у себе різні похибки, які проявляються з різною амплітудою, частотою і фазою. Складна взаємодія деталей підшипника при його обертанні та проковзування при роботі викликає розгляд биття шпинделя як стаціонарного випадкового процесу.

Усі складові биття шпинделя, частота ω яких не дорівнює частоті обертання шпинделя ω_n , мають значний вплив на шорсткість поверхні та величину похибки форми (некруглості). Для точності обробки виробів на фрезерних, зубошліфувальних і верстатах з автоматичною зміною інструмента складова биття шпинделя з частотою $\omega = \omega_n$ є критично важливою. Складова биття з частотою $\omega = \omega_n$ дуже важлива для перевірки верстата на такі параметри, як биття пояса шпинделя, конічного отвору та ін., оскільки вона зазвичай дорівнює 80-90% усієї величини биття.

Немає однозначної відповідності між биттям осі обертання шпинделя та биттям шпинделя. Це пояснюється тим, що підшипники, на яких монтується шпиндель, не мають прямого зв'язку між ексцентриситетом e підшипників щодо їхніх отворів і некруглістю ΔR опорних поверхонь шпинделя.

Вимірювання, проведені на великій кількості шліфувальних верстатів, включаючи ті, які знаходяться в експлуатації, показали, що між биттям шпинделя та биттям H осі обертання шпинделя не існує кореляційного зв'язку. Це означає, що при оцінці якості шпиндельних вузлів верстатів необхідно роздільно визначити биття шпинделя H_{cp} та биття H осі обертання шпинделя.

Можна вирішити цю проблему за допомогою методу частотного аналізу биття шпинделя, який наведено нижче.

Датчики можна використовувати для запису биття шпинделя. Вони можуть контактними або безконтактними. Пристрій що записує та підсилювач з'єднуються з датчиками. Крива, записана, ділиться на рівні проміжки. Кількість цих проміжків повинна бути кратною n обертів шпинделя верстату, зроблених під час запису биття. Низка ординат точок поділу це i є дискретна задана функція $y(t)$ биття шпинделя, а t - незалежна перемінна яка означає час або кут повороту.

Можливе виділення періодичної складової за умови її спектрального

розкладання, якщо маємо випадкову функцію $y(t)$. Ми оцінюємо спектральну щільність стаціонарного випадкового процесу за допомогою перетворення Фур'є. За умови, що реалізація $y(t)$ задана на інтервалі часу $(0, T)$, обчислення проводимо за формулою 4.1. [7]

$$\tilde{S}(\omega) = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\pi} \left[\int_0^T y(t) e^{i\omega t} dt \right]^2. \quad (4.1)$$

Спектральна щільності обчислюється по дискретно заданій (числом N крапок) функції $y(t)$ [7]:

$$S(\omega) = \frac{T}{4\pi} [u^2(\omega) + v^2(\omega)], \quad (4.2)$$

де
$$u(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos(\omega kT / N); \quad v(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin(\omega kT / N).$$

На рис. 4.6 показано результати обробки запису биття шпинделя верстата, виконаної за формулою (4.2). Впливає, з биттям, обумовленим ексцентриситетом, з частотою виділена складова биття, обумовлена хвилястістю поверхонь підшипника, і рівна $0,45\omega_n$, що має збіг з теоретичним значенням частоти обертання досліджуваного підшипника $\omega_c = 0,44810\omega_n$. Крім того, дані показують високу точність форми поверхонь підшипників.

Замінивши перетворення Фур'є розкладанням у ряд Фур'є, ми спростили обчислення. Оскільки похибки підшипника (овальність і огранювання) відбуваються з частотою, кратною частоті ω_n , а швидкість приблизно дорівнює 1/2 швидкості обертання шпинделя, така заміна є допустимою. Ряд Фур'є має такий вигляд для функції розкладання $y(t)$ [7]:

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^N (a_m \cos k\varphi + b_m \sin k\varphi), \quad (4.3)$$

де $\varphi = 2\pi m / N$, а m – порядковий номер гармоніки.

Коефіцієнти ряду Фур'є обчислюються: $a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k$;

$$\begin{aligned}
 a_m &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \cos(2\pi mk / N); \\
 b_m &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \sin(2\pi mk / N); \\
 C_m &= \sqrt{a_m^2 + b_m^2}.
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

$$C(\omega) = \sqrt{v^2(\omega) + u^2(\omega)}, \text{ мкм.}
 \tag{4.5}$$

4.3.2 Фур'є – аналіз кривої биття

Було зроблено запис биття шпинделя верстата. Вимірювали точність обертання шпинделя на геометричну точність (радіальне та осьове биття) за допомогою індикатора.

Було застосовано безконтактні перетворювачі (індуктивні, ємнісні, фотоелектричні) для вимірювання биття за робочого обертання шпинделя. Для вимірювання обирали точну оправку (циліндричну чи сферичну), яку вмонтували у корпус шпинделя. Можна замість оправки обирати точне дзеркало (сферичне або циліндричне) за фотоелектричних методів виміру.

Використовуючи формули (4.3) і (4.4), було зроблено обробку запису биття шпинделя. Це відбувалося за допомогою комп'ютера у модулі DPF.pas програмі CORREL, який написаний для дискретного Фур'є перетворення (ДПФ) – в середовищі Borland Delphi 7 (Додаток А.1) Окрім коефіцієнтів також рахуються ординати y_1, y_2, y_3, y_{1+3} кривих биття та розмахи H_1, H_2, H_3, H биття цих кривих. Криві биття – це суми гармонік розкладання кривої биття в ряд Фур'є сформованих за певним правилом [8]. Перша складова биття - сума всіх гармонік з частотами $\omega < \omega_n$. Розмах H_1 - це кількісна характеристика першої складової (відповідає за шорсткість поверхні оброблюваної деталі). Друга складова представляє гармоніку з частотою $\omega = \omega_n$, а розмах H_2 відповідно - кількісну характеристику. Третя складова – сума всіх гармонік, з частотами $\omega > \omega_n$ та розмах H_3 (впливає на круглість деталі). Сума всіх гармонік з частотами $\omega \neq \omega_n$ це і є відновлена крива биття осі обертання шпинделя. Її ординати дорівнюють $y_1 + y_3 = y - y_2$. Розмах H – це узагальнена характеристика

точності обертання шпинделя. Розмах H_1 - це узагальнена характеристика впливу похибок комплекту тіл кочення на точність обертання шпинделя. Розмах H_2 - це подвоєний приведенний ексцентриситет. Розмах H_3 - це узагальнена характеристика впливу похибок форми доріжок кочення на точність обертання шпинделя (частоти зміщення осі обертання шпинделя викликані обертанням внутрішнього кільця підшипника). Результати аналізу кривої биття по еталону надано на вкладці «ДПФурье» інтерфейсу програми CORREL (рис. 4.6).

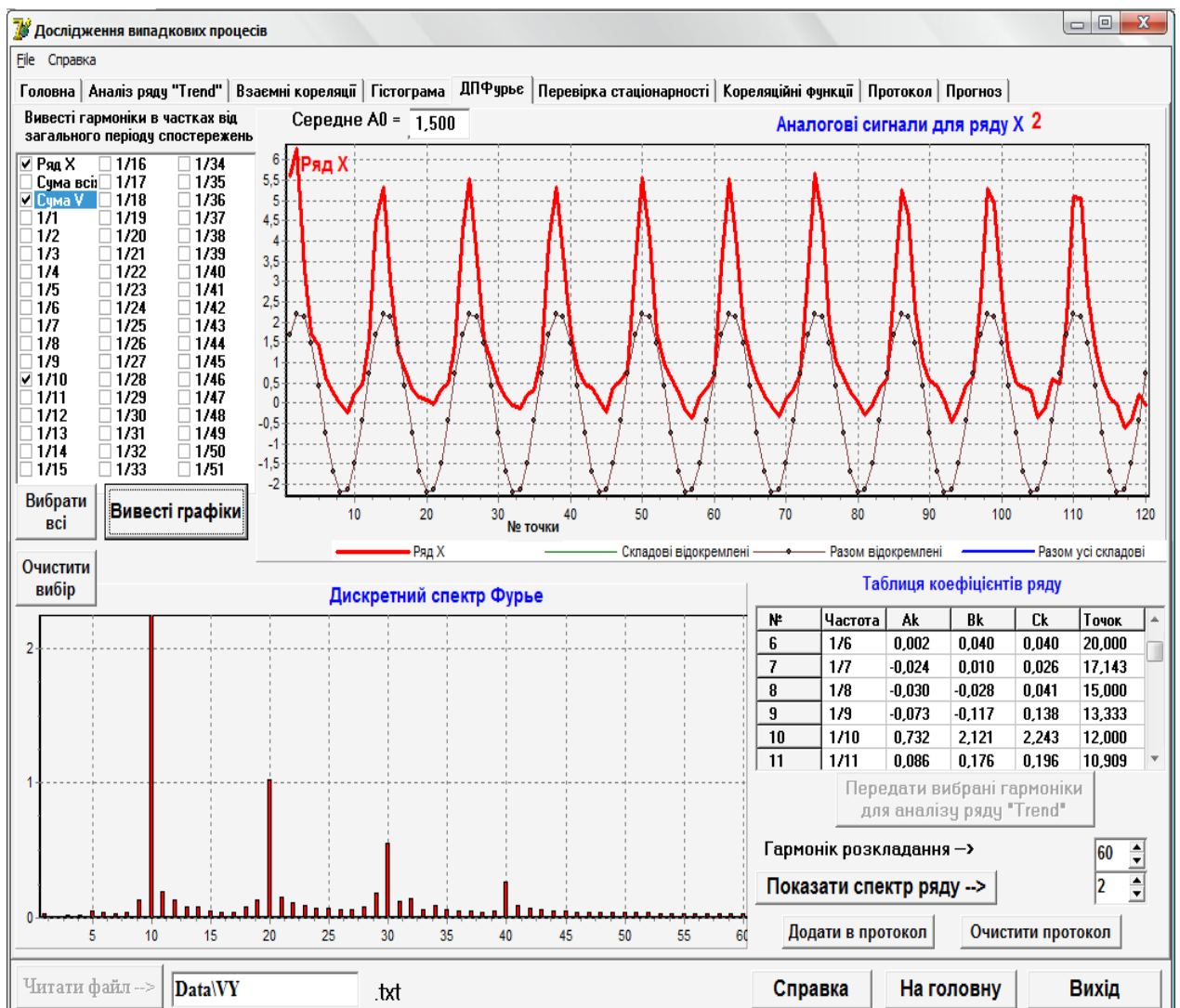


Рис. 4.6. Вкладка «ДПФурье» програми CORREL; розмах H_2 (приведений ексцентриситет, подвоєний) та експериментальний ряд y_k коливань; частота ω_n одного оберту

Колівання з частотою ω_n проходять з амплітудою $A = 2,24$ мкм і пояснюють чисте биття шпинделя. Це зазначено у таблиці коефіцієнтів ряду для

гармоніки №10 (період 12 точок). Із графіку «Дискретний спектр Фур'є» впливає: що спектр має 4 яскраво відокремлених частоти (гармоніки) №№: 10, 20, 30 і 40, що відповідають коливанням з частотами ω_n , $\omega_n/2$, $\omega_n/3$ і $\omega_n/4$. За допомогою цих гармонік під час обробки заготовки визначають: еліпсність ($A=1,029$ мкм), огранку 3 ($A = 0,5$ мкм), огранку 4 ($A=0,25$ мкм), ексцентричність ($A=2,243$ мкм).

Сумарний вплив цих складових наведений на рис 4.7. Видно, що ці коливання практично співпадають з розмахом H .

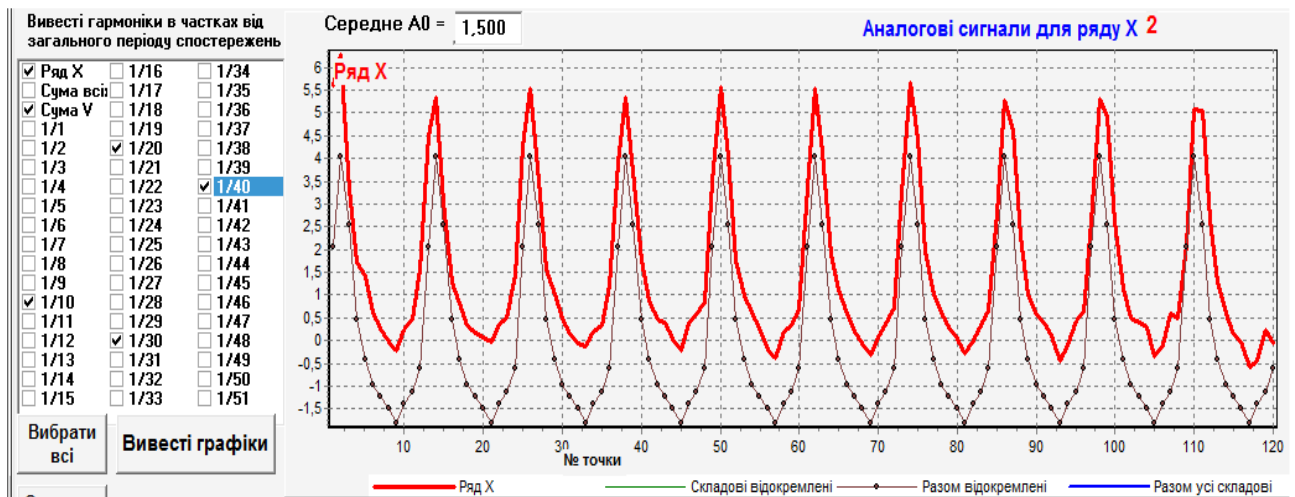


Рис 4.7. Сумарний вплив складових з частотами ω_n , $2\omega_n$, $3\omega_n$ і $4\omega_n$

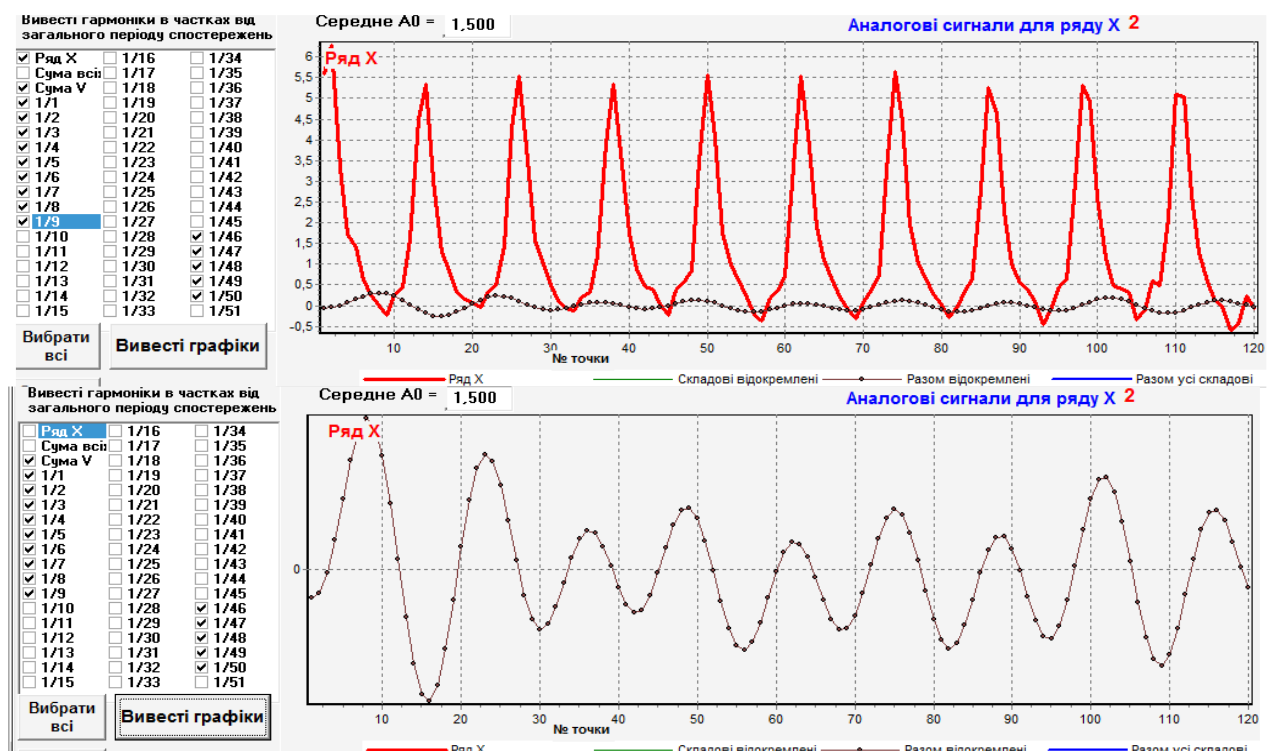


Рис. 4.8. Вплив доріжок і тіл кочення (частоти $\omega_i < \omega_n$, розмах H_3)

На рис. 4.8 представлена дія доріжок і тіл кочення (розмах H_3 , частоти $\omega_i < \omega_n$). При цьому $H_3 = 0,6 \dots 0,7$ мкм – приблизне сумарне значення розмаху. На нижньому графіку 4.8 надано форму цієї кривої.

На графіку 4.9 представлено розмах H_1 (суму всіх гармонік з частотами $\omega_i > \omega_n$). $H_1 = 4,5$ мкм – приблизне сумарне значення розмаху. Цей показник впливає на шорсткість поверхні оброблюваної заготовки.

Розмах H відновленої кривої биття $\omega_i \neq \omega_n$ подано на рис. 4.10. $H = 4,8$ мкм – узагальнена характеристика точності обертання шпинделя.

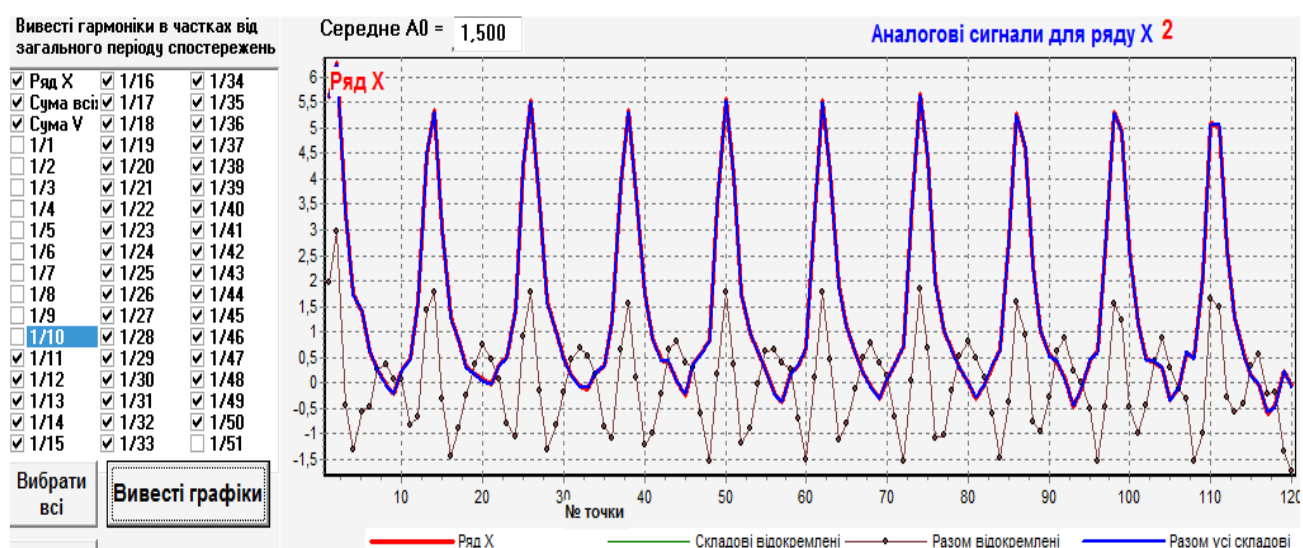


Рис. 4.9. Розмах H_1 – сума всіх гармонік з частотами $\omega_i > \omega_n$

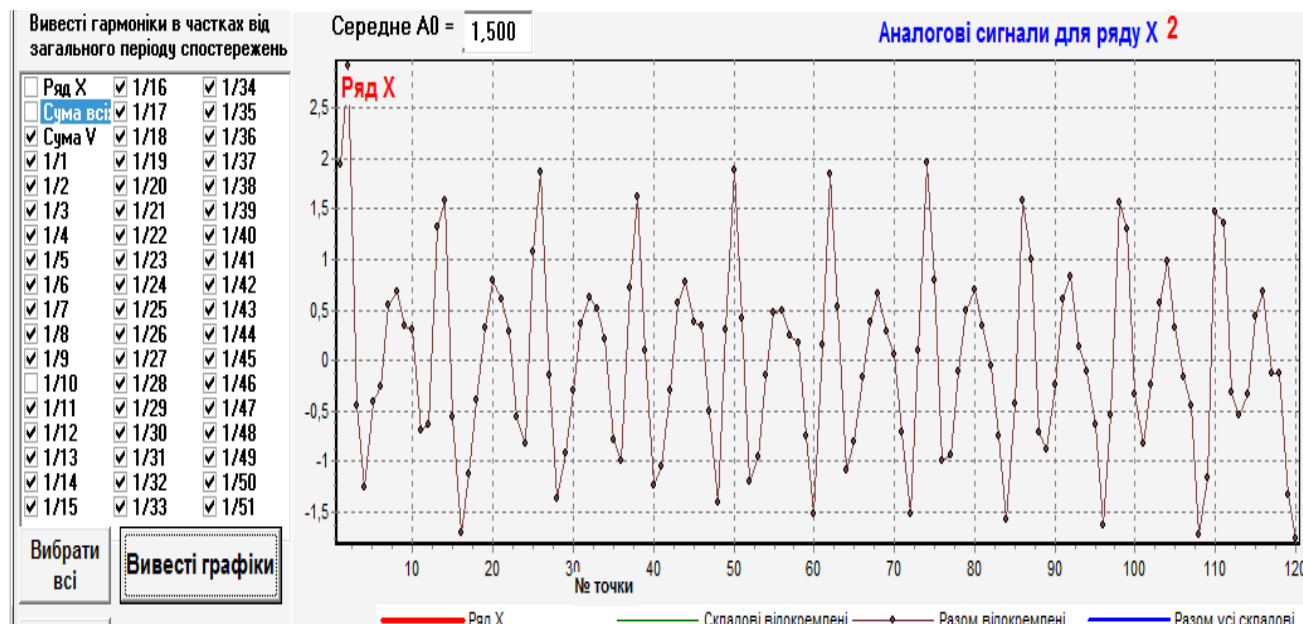


Рис. 4.10 - Розмах H відновленої кривої биття $\omega_i \neq \omega_n$

Проведений дискретний Фур'є – при повздовжньому точінні аналіз кривої биття шпинделя дозволяє приблизно діагностувати по частотах якість збирання ШВ і вплив окремих елементів технологічної системи на точність і якість обробки. Результати цього аналізу зведені у таблицю 4.1.

4.3.3 Встановлення зав'язків по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками

Дискретний Фур'є – аналіз дозволяє прийняти діагностичні ознаки (симптоми) 1 - 7, які наведені в табл. 4.1. Перевищення значень розмахів слугує для діагностування відповідних елементів системи.

Таблиця 4.1- Результуючі значення частотного аналізу кривої u_k биття

№	Параметр	Ім'я	Частоти	Значення, мкм	Вплив на точність і якість обробки, і їх джерела
1	Розмах	Score_y	Всі	7,5	Всі параметри
2	Розмах H	Score_H	$\omega_i \neq \omega_n$	4,8	Точність обертання: всі джерела без неспіввідності осі шпинделя і заготовки
3	Розмах H_1	Score_H1	$\omega_i > \omega_n$	4,5	Шорсткість і хвилястість: тіла кочення, привод, доріжки кочення
4	Розмах H_2	Score_H2	$\omega_i = \omega_n$	2,24	Биття: неспіввідність осі шпинделя і заготовки
5	Розмах H_3	Score_H3	$\omega_i < \omega_n$	0,6...0,7	Хвилястість: доріжки кочення підшипників, сепаратори, супорт
6	Розмах H_4 №№ 1+2+3+4	Score_H4	$2\omega_n+3\omega_n+4\omega_n$	1,2	Хвилястість: похибки доріжок кочення
7	Розмах H_5 без №№1, 2, 3 і 4	Score_H5	$y-\omega_n-2\omega_n-3\omega_n-4\omega_n$	3,3	Шорсткість: вплив приводу, супорт

Слід зауважити, що окремі частоти коливань можуть викликатися різними причинами, тому задача діагностики в цієї постановці є багатоваріантною, неформальною і невизначеною. Зв'язок по частотах можливих причин (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами) зображений на рис. 4.11.

Для комп'ютерного аналізу зручніше представити цей зв'язок у вигляді матриці інцидентності (табл. 4.2), де «1» означає зв'язок, «0» - відсутність зв'язку.

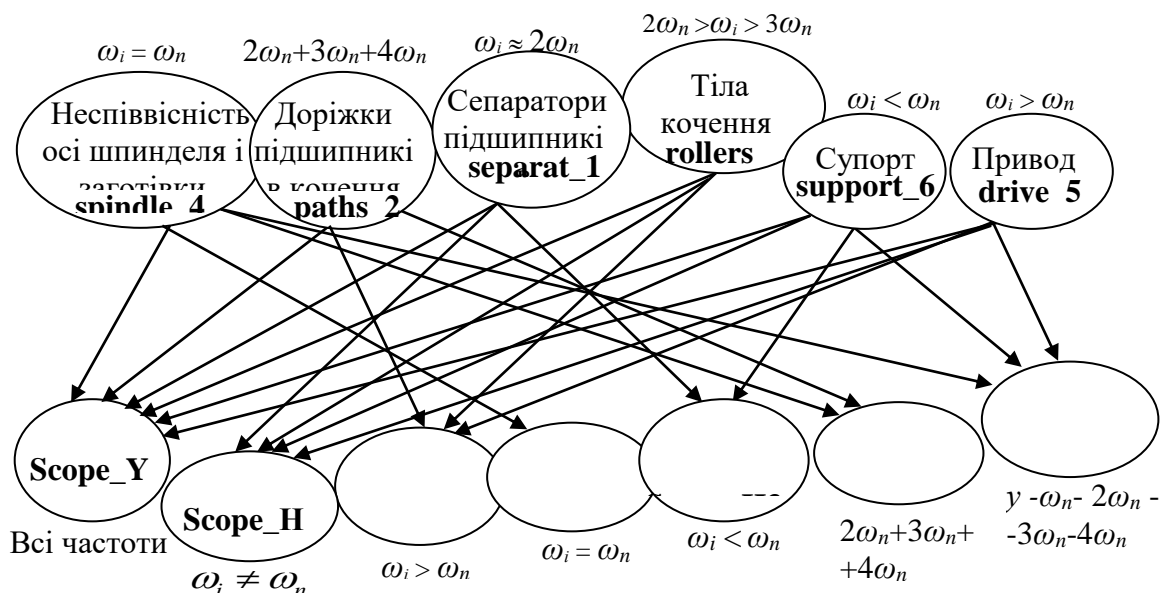


Рис. 4.11 - Схема зв'язків по частотах можливих джерел (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами)

Таблиця. 4.2 - Матриця інцидентності зв'язків джерел можливих похибок з діагностичними ознаками

Діагностичні ознаки	Джерела можливих похибок					
	separat_1	paths_2	rollers_3	spindle_4	drive_5	support_6
Score_Y	1	1	1	1	1	1
Score_H	1	0	1	0	1	1
Score_H1	0	1	1	0	1	0
Score_H2	0	0	0	1	0	0
Score_H3	1	0	0	0	0	1
Score_H4	0	1	0	1	0	0
Score_H5	0	0	0	1	1	1

4.4 Навчання мережі Байєса для діагностики шпиндельної групи

Як можна бачити з попереднього аналізу (див. п. 4.3.3), зв'язок по частотах можливих джерел (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами) не однозначний. Окремі діагностичні ознаки (симптоми) можуть викликатися групою джерел. Так, наприклад, перевищення розмаху Score_H1 з частотами $\omega_i > \omega_n$, який є причиною появи надмірних шорсткості і хвилястості, може викликатися одночасно погрішностями доріжок кочення підшипників (paths_2), нерівномірністю тіл кочення (rollers_3) і вібраціями з боку приводу (drive_5). Це обумовлює також і можливий зв'язок в мережі Байєса між окремими розмахами.

Тобто структуру оптимальної БМ не можна передбачити заздалегідь без її побудови програмою VNetMaster.

4.4.1 Побудова матриці навчання мережі

Матрицю навчання мережі (див. рис. 3.3) зазвичай отримують з низки спостережень за об'єктом діагностики в роботі. При цьому фіксуються стани симптомів і відповідні їм діагнози. Але це потребує в нашому випадку довготривалих спостережень, трудомістких процесів розбирання і збирання вузлів шпіндельної групи. Тобто мережу можна буде все ж таки навчити ціною значних зусиль, але к тому часу, коли верстат фізично, або морально застаріє. До того ж процеси розбирання і збирання порушують вихідний стан об'єкту діагностики, тобто втрачається таке поняття як ексклюзивність чи неповторність об'єкту.

В даній роботі пропонується навчання БМ шляхом математичного моделювання дефектів.

Для навчання БМ обрана відповідна градація станів вершин БМ:

- для середніх амплітуд два стани: Small – менше (не перевищують допустимих), Large – більше (перевищують допустимі значення);
- для розмахів три стани: Well – нормально (нижче зони ризику), Alarm – тривога (в зоні ризику, але в допуску), Badly – погано (за межами допуску) .

На першому етапі записується крива биття точного вузла чи нового верстата, чи верстата відновленого після його обслуговування (див. рис. 4.6.). Дискретний спектр Фур'є цього коливального процесу будьмо враховувати еталонним.

Потім з врахуванням встановлених зв'язків (див. табл. 4.2 і рис. 4.11) на еталонну криву биття накладаємо збурення по амплітудах відповідно відокремлених розмахів (див. рис. 4.11) з імітацією шуму експерименту.

Для реалізації цієї методики, тобто генерації і навчання БМ, був дописаний додатковий модуль NetV.pas програми CORREL також в середовищі Borland Delphi 7 (Додаток А.2). Вкладка «Навчання мережі Байєса» програми CORREL показана на рис. 4.12.

Поточні дані по розмахах коливань

Розмах	Score Y	Score H	Score H1	Score H2	Score H3	Score H4	Score H5
Максимум	8.24	5.09	4.61	5.42	0.96	4.06	1.68
№ 71	2.91	2.91	2.66	0.19	1.18	0.73	3.05
Danger	7.00	4.33	3.92	4.61	0.82	3.45	1.43

Поточні дані по амплітудах коливань

Large	separat 1	paths 2	rollers 3	Spindle 4	Drive 5	Support 6
Максимум	0.273	0.782	0.037	2.712	0.098	0.050
Еталон	0.228	0.651	0.031	2.260	0.082	0.041
Кортеж №	0.060	0.152	0.026	0.105	0.098	0.061

Таблиця навчання мережі

Кортеж	separat 1	paths 2	rollers 3	Spindle 4	Drive 5	Support 6	Score Y	Score H	Score H1	Score H2	Score H3	Score H4	Score H5
1. Еталон	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Well	Well	Well	Well	Well	Well	Well
№ 2	Small	Large	Large	Small	Large	Small	Badly	Badly	Badly	Badly	Alarm	Alarm	Badly
№ 3	Large	Large	Large	Large	Large	Small	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 4	Small	Large	Large	Small	Small	Large	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 5	Large	Large	Large	Large	Large	Small	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Badly	Badly
№ 6	Large	Large	Large	Large	Large	Large	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 7	Small	Small	Large	Small	Small	Large	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 8	Large	Large	Large	Large	Large	Small	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 9	Large	Large	Large	Small	Large	Small	Alarm	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 10	Large	Large	Large	Small	Large	Large	Badly	Badly	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 11	Large	Small	Large	Large	Large	Large	Alarm	Alarm	Badly	Alarm	Badly	Alarm	Badly
№ 12	Small	Small	Large	Small	Large	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 13	Large	Large	Large	Small	Large	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 14	Large	Large	Large	Small	Large	Small	Well	Badly	Badly	Well	Alarm	Alarm	Badly
№ 15	Large	Small	Large	Small	Small	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 16	Large	Small	Small	Small	Small	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 17	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Well	Badly	Badly	Well	Alarm	Well	Badly
№ 18	Large	Small	Large	Small	Large	Small	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 19	Large	Large	Large	Small	Large	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 20	Large	Large	Large	Small	Large	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 21	Large	Large	Large	Small	Large	Large	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 22	Large	Small	Large	Small	Large	Small	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 23	Large	Large	Large	Small	Small	Small	Well	Badly	Badly	Well	Well	Badly	Badly
№ 24	Large	Small	Large	Small	Small	Small	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 25	Large	Small	Large	Small	Small	Small	Well	Badly	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly
№ 26	Large	Large	Large	Small	Small	Large	Well	Alarm	Badly	Well	Badly	Alarm	Badly

Рис. 4.12 - Вкладка «Навчання мережі Байєса» програми CORREL

Границя Badly розмахів встановлюється настроюванням «Запас zR по розмахах, %». При цьому розмах $R_{\text{Badly}} (\text{Максимум}) = R_{\text{Еталон}}(1+zR/100)$.

Границя Alarm розмахів встановлюється настроюванням Riz «Зона ризику, %». При цьому розмах $R_{\text{Alarm}} (\text{Danger}) = R_{\text{Badly}} (1-Riz/100)$.

Таким чином, якщо при генерації кроку навчання відповідний розмах $R > R_{\text{Badly}}$, то в комірку «Таблиці навчання мережі» для цього розмаху записується «Badly», $R_{\text{Alarm}} \leq R \leq R_{\text{Badly}}$ – «Alarm» і, якщо $R \leq R_{\text{Alarm}}$ – «Well».

Аналогічно для середніх амплітуд. Границя $A_{\text{сер_max}}$ відповідних діапазонів розмахів встановлюється настроюванням Riz «Зона ризику, %», $A_{\text{сер_max}} = A_{\text{сер_Еталон}}(1+Riz/100)$.

Якщо генероване $A_{\text{сер_генероване}} \leq A_{\text{сер_max}}$ то в комірку «Таблиці навчання мережі» для джерела коливань записується «Small», якщо $A_{\text{сер_генероване}} > A_{\text{сер_max}}$ – «Large».

Настройка dA «Перевищення амплітуд від еталону при генерації, %» слугує для встановлення рівня амплітудних збурень. При цьому по кожній генерованій

амплітуді дається прирощення $\Delta A_i = A_i \cdot (dA/2 + A_{ie})$, де A_{ie} - шум експерименту, параметри якого задаються генератором випадкових псевдо нормальних чисел $N(A,S)$ з параметрами A і S , де A – середнє значення, S - середнє квадратичне відхилення гаусового шуму, мкм. Величина $N(A,S)$ змінюється на кожному кроці для кожної генерованої амплітуди.

Для роботи програми завантажується текстовий файл з даними за указаним шляхом (в нашому випадку Data\VY.txt). При цьому робиться активною вкладка «Навчання мережі Байєса».

Далі встановлюються настройки програми, які згруповані у вікнах вкладки у верхньому лівому куту. Настройки, які вже встановлені за замовченням гарантують адекватне навчання.

Наступним кроком треба завантажити в «Таблицю навчання мережі» еталонний ряд (клацнути кнопкою «Завантажити еталон для мережі Байєса»). При цьому заповнюються граничні значення амплітуд і розмахів у відповідні таблиці, а також перша стрічка «Таблиці навчання мережі», де, як для еталону, в комірках джерел заносяться «Small», а в комірках розмахів – «Well».

В компоненті «Вибір частот генерації для:» можна вибрати відповідний діапазон розмахів коливань, для якого буде згенеровано кілька циклів (вказано в настройці «Циклів генерації для обраного діапазону частот», в нашому випадку 10). Це означає, що в «Таблицю навчання мережі» буде занесене 10 рядків зі станами вузлів БМ.

Генерація мережі можлива у трьох варіантах:

1) покрокове для обраного діапазону розмахів в настройці «Вибір частот генерації для:», якщо скинутий прапорець з «Автоматична генерація», а число циклів генерацій встановлено 1;

2) цикл для обраного діапазону розмахів в настройці «Вибір частот генерації для:», якщо скинутий прапорець з «Автоматична генерація», а число циклів генерацій встановлено більше 1;

3) автоматична генерація таблиці по всіх діапазонах розмахів з встановленим числом циклів для кожного діапазону, для цього треба встановити

прапорець «Автоматична генерація», а число циклів генерацій встановити будь яке.

При генерації по першому варіанту передбачено автоматичній перехід на вкладку «ДПФурье», де для вибраних режимів показується дискретний спектр Фур'є і графічне представлення розкладання (див. рис. 4.6). Для цього треба встановити прапорець «Після генерації показувати графік».

Програма дозволяє видаляти генеровану таблицю як по рядках кнопкою «Назад», так і повністю кнопкою «Скинути навчання».

Заповнена таблиця зберігається у форматі xls командою «Зберегти таблицю». Бажано для зберігання назначити каталог «..\BaesNet», але це не принципово.

Збережений файл слугує вихідними даними для роботи програми BNetMaster побудови й аналізу мереж Байєса, роботу з якою описано в Розділі 3.

4.4.2 Побудова й аналіз мережі для діагностування шпиндельної групи верстата

Для генерації таблиці навчання було обрано режими: «Автоматична генерація», число циклів генерацій 10. Інші настройки прийняті за умовчанням (див. рис. 4.12). Генерована таблиця наведена в Додатку Б.

По генерованій таблиці програмою BNetMaster була побудована оптимальна структура БМ (рис. 4.13). Протокол генерації матриці навчання БМ наведений в Додатку В.

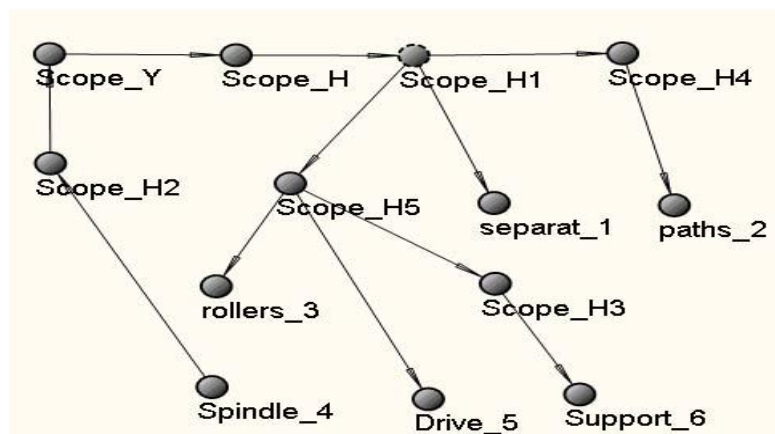


Рис. 4.13. - Побудована оптимальна структура БМ діагностування шпиндельної групи верстата

Структура мережі, як і передбачалося на основі попереднього аналізу зв'язків по частотах можливих джерел (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами).

Як можна бачити з попереднього аналізу (див. п. 4.3.3, рис. 4.11 і табл. 4.2), зв'язок по частотах можливих джерел (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами) в цієї БМ не однозначний. Тобто причинно-наслідкові зв'язки в цієї структурі є як прямі від симптому до діагнозу, так і зворотні. Мають місце також зв'язки між симптомами (розмахами). Це в принципі не суперечить структурі взаємодій, які наведені на рис. 4.11.

За побудованою структурою БМ було проведено діагностування для 3 випадки проявлення діагностичних ознак (симптомів).

4.4.3 Діагностика дефектів шпindelної групи з використанням розробленої мережі Байєса

Діагностика при небезпечному загальному рівні коливань Score_Y

Для діагностування ініціювалася вершина Score_Y як прихована і в стані «Alarm», цьому стану було надано ймовірність $p_{Alarm} = 1$. Інші стани вершини Score_Y мають ймовірності $p_{Well} = 0$, $p_{Badly} = 0$ (рис. 4.14).

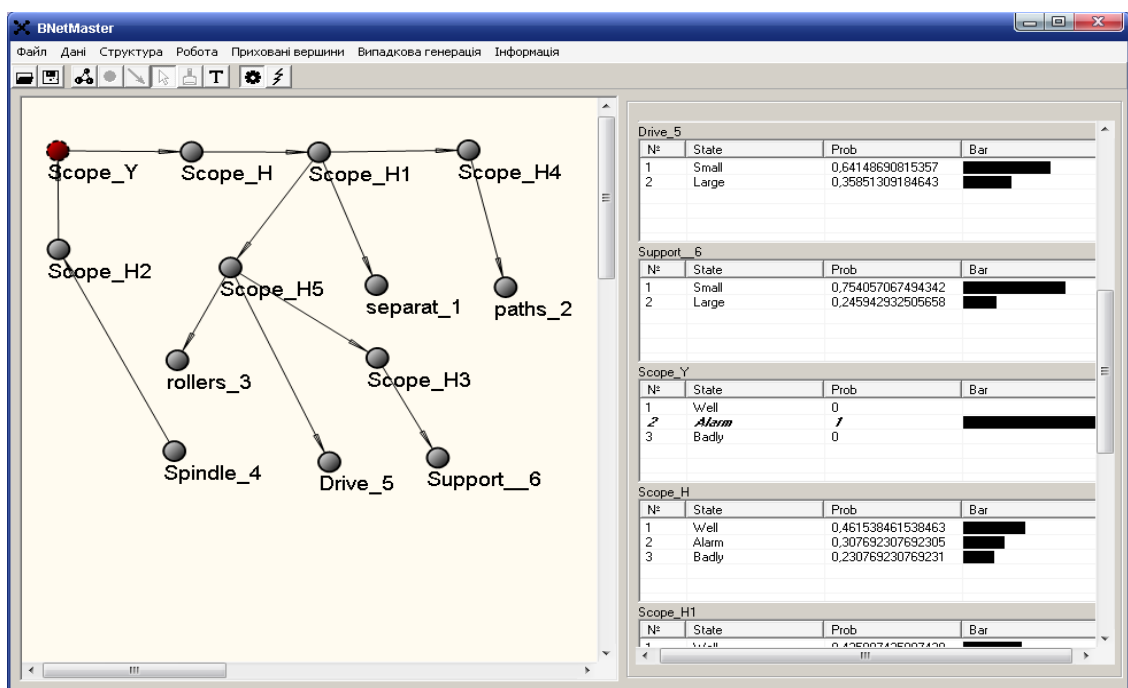


Рис. 4.14 - Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованій Score_Y з $p_{Alarm} = 1$

Розраховані значення умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ наведені в таблиці табл. 4.3 і на рис. 4.15, 4.16.

Таблиця. 4.3 - Розраховані умовні ймовірності вершин БМ для випадку небезпечного загального рівню коливань $Score_Y = \text{«Alarm»}$

Умовні ймовірності станів вершин БМ			
Вершини	Well	Alarm	Badly
Score_Y	0	1	0
Score_H	0,461	0,308	0,231
Score_H1	0,436	0,282	0,282
Score_H2	0,466	0,282	0,282
Score_H3	0,465	0,344	0,281
Score_H4	0,595	0,191	0,214
Score_H5	0,374	0,344	0,282
Вершини	Small	Large	
separat_1	0,674	0,325	
paths_2	0,719	0,281	
rollers_3	0,772	0,228	
spindle_4	0,871	0,129	
drive_5	0,641	0,359	
support_6	0,754	0,246	

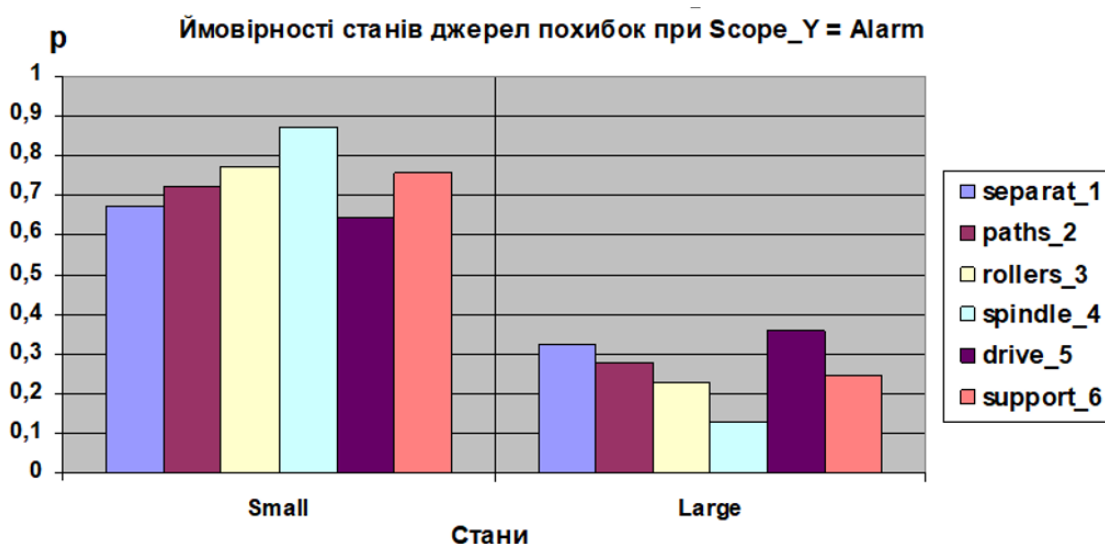


Рис. 4.15 - Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку небезпечного загального рівню коливань $Score_Y = \text{«Alarm»}$

Результати розрахунку показують, що ймовірності перевищення допустимих розмахів коливань в цілому невеликі, але є сенс звернути увагу на привод (drive_5), як на джерело з найбільш високою ймовірністю $p_{\text{Large}}=0,359$.

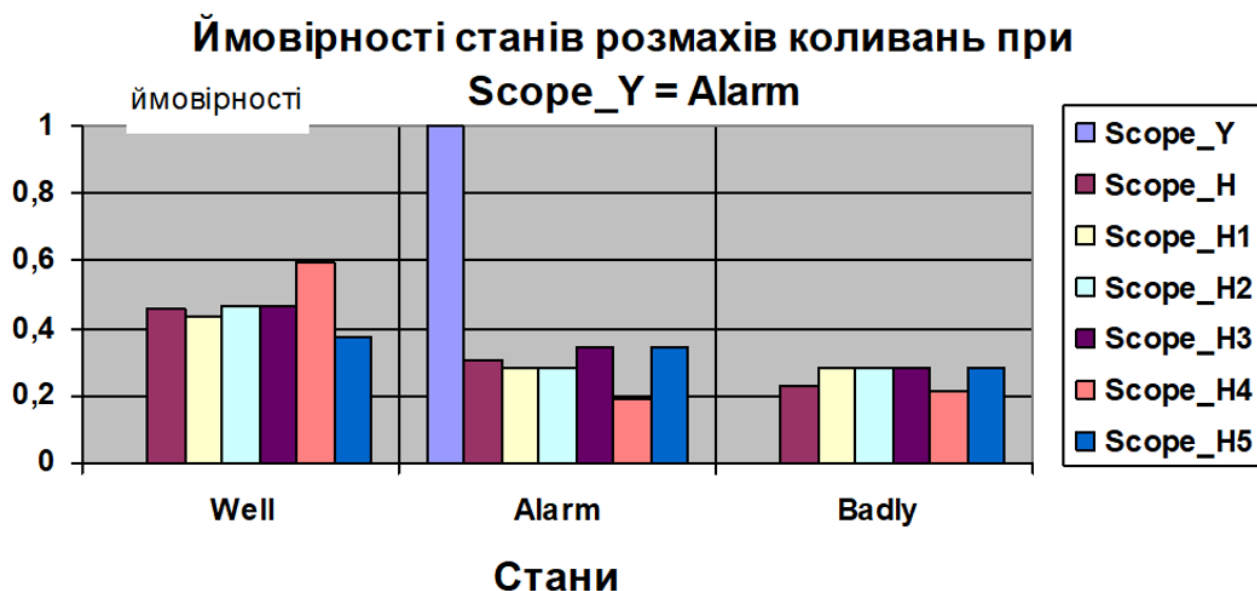


Рис. 4.16 - Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку небезпечного загального рівню коливань Score_Y = «Alarm»

Діагностика при небезпечному загальному рівні коливань Score_Y і Score_H

Для діагностування ініціювалася як приховані вершини; Score_Y і в стані «Alarm» і ; Score_H1 і в стані «Alarm» , цьому стану було надано ймовірність $p_{Alarm} = 1$. Інші стани цих вершин мають ймовірності $p_{Well} = 0$, $p_{Badly} = 0$ (рис. 4.17). Це означає, що зафіксовано небезпечні рівні загального розмаху коливань у і розмаху коливань H1 з частотами $\omega_i > \omega_n$ (шорсткість і хвилястість).

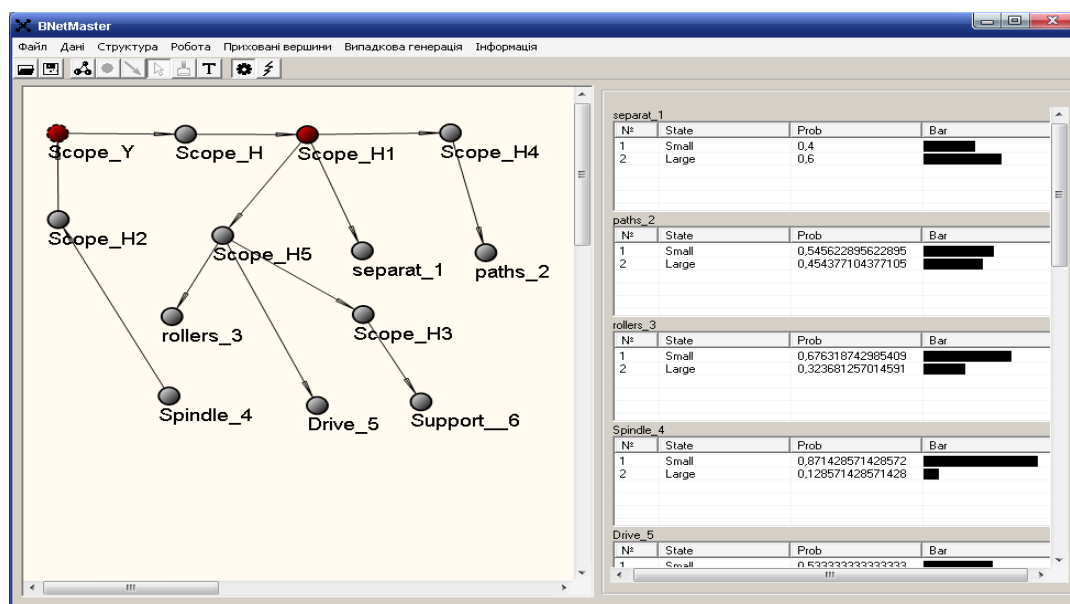


Рис. 4.17- Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованих Score_Y і Score_H1 з $p_{Alarm} = 1$
Розраховані значення умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ

наведені в таблиці табл. 4.4 і на рис. 4.18, 4.19.

Таблиця 4.4 - Розраховані умовні ймовірності вершин БМ для випадку небезпечного загального рівню коливань $Score_Y = \text{«Alarm»}$ і $Score_H1 = \text{«Alarm»}$

Умовні ймовірності станів вершин БМ			
Вершини	Well	Alarm	Badly
Score_Y	0	1	0
Score_H	0,273	0,273	0,454
Score_H1	0	1	0
Score_H2	0,595	0,19	0,215
Score_H3	0,32	0,326	0,354
Score_H4	0,167	0,333	0,5
Score_H5	0,111	0,333	0,556
Вершини	Small	Large	
separat_1	0,4	0,6	
paths_2	0,546	0,454	
rollers_3	0,676	0,324	
spindle_4	0,871	0,129	
drive_5	0,533	0,467	
support_6	0,658	0,342	

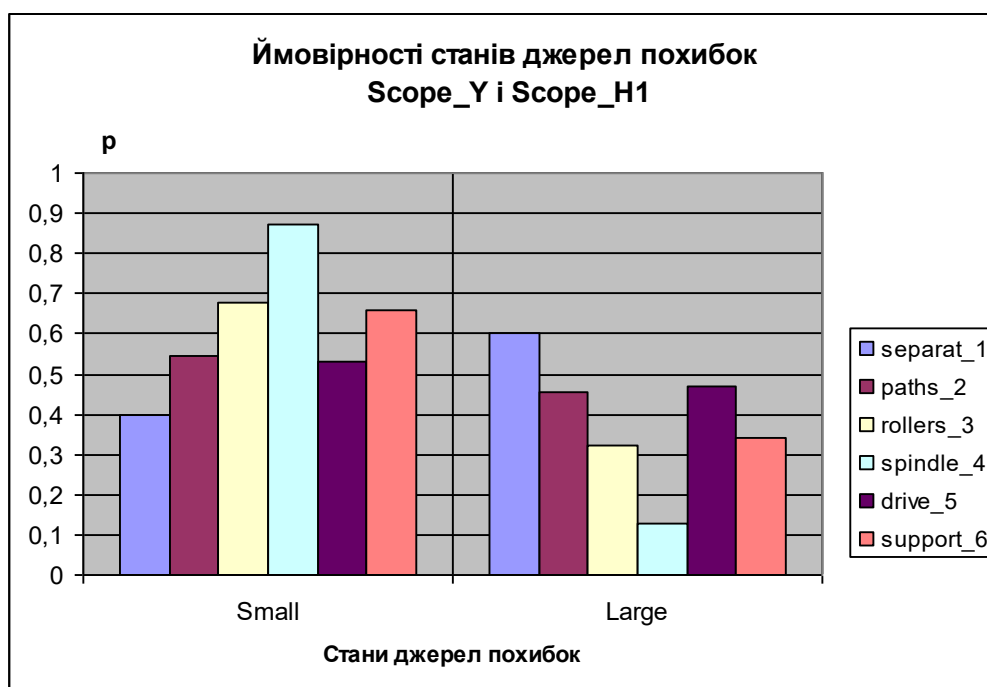


Рис. 4.18 - Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку небезпечного загального рівню коливань $Score_Y = \text{«Alarm»}$ і $Score_H1 = \text{«Alarm»}$

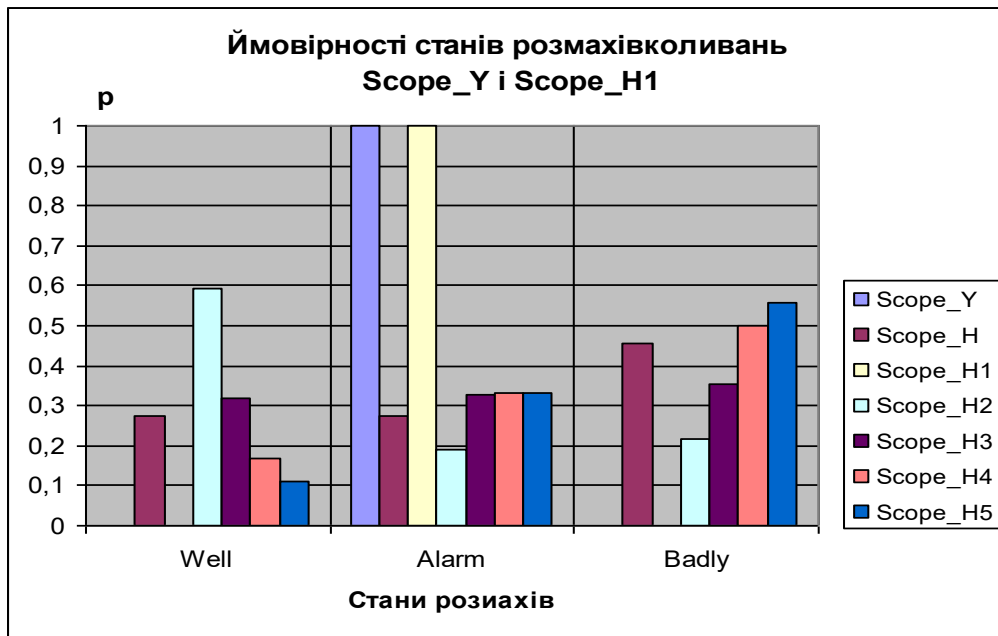


Рис. 4.19 - Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку небезпечного загального рівню коливаний Score_Y = «Alarm» і Score_H1 = «Alarm»

Діагностика при перевищенні допустимого рівню коливаний Score_H5

Для діагностування ініціювалася, як прихована вершина Score_H5 в стані «Badly», цьому стану вершині було надано ймовірність $p_{\text{Badly}} = 1$. Інші стани цих вершин мають ймовірності $p_{\text{Well}} = 0$, $p_{\text{Alarm}} = 0$ (рис. 4.20). Це означає, що зафіксовано небезпечний рівень розмаху коливаний H5 з частотами $\omega_i = \gamma - \omega_n - 2\omega_n - 3\omega_n - 4\omega_n$, що викликають підвищену шорсткість і неперіодичну хвилястість від низькочастотних коливаний супорту.

Розраховані значення умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ наведені в таблиці табл. 4.5 і на рис. 4.21, 4.22.

Результати розрахунку показують, що ймовірності перевищення допустимих розмахів коливаний досить великі для Score_H4 ($p_{\text{Badly}} = 0,5$) і Score_H5 ($p_{\text{Badly}} = 0,556$). Є сенс звернути увагу на стан підшипників, а саме їх сепараторів (separat_1, $p_{\text{Large}}=0,6$), як на джерело з найбільш високою ймовірністю $p_{\text{Large}}=0,359$, а також доріжок кочення (paths_2, $p_{\text{Large}}=0,454$). Досить висока також ймовірність впливу вібрацій з боку приводу (drive_5, $p_{\text{Large}}=0,467$).

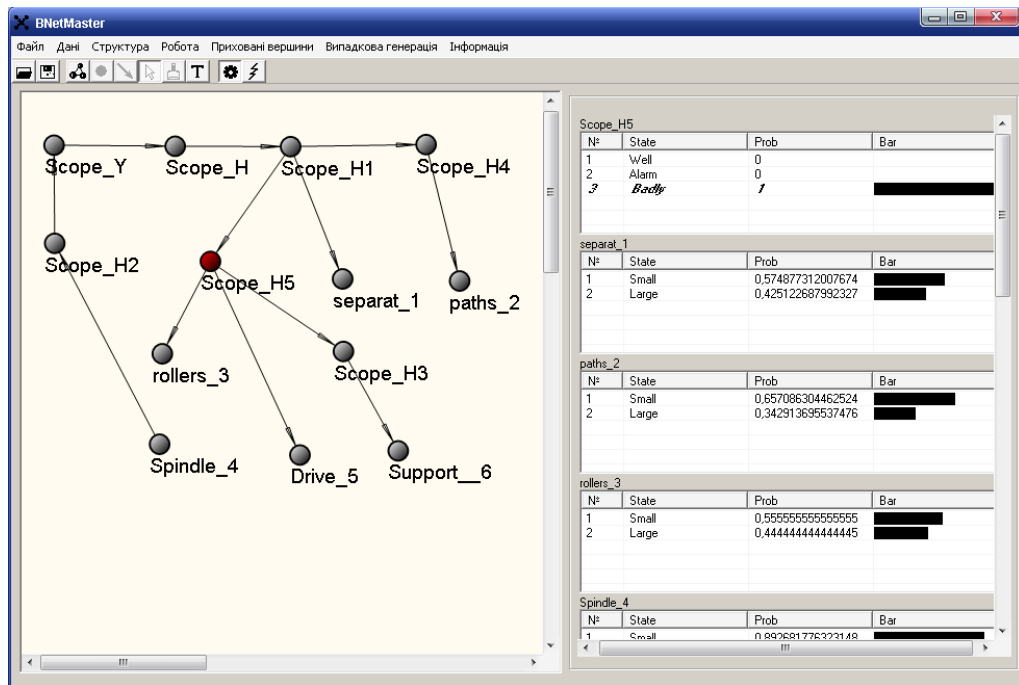


Рис. 4.17 - Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованій Scope_H5 з $p_{\text{Badly}} = 1$

Таблиця. 4.5 - Розраховані умовні ймовірності вершин БМ для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Scope_H5 = «Badly»

Умовні ймовірності станів вершин БМ			
Вершини	Well	Alarm	Badly
Scope_Y	0,58	0,22	0,2
Scope_H	0,521	0,189	0,29
Scope_H1	0,265	0,202	0,533
Scope_H2	0,726	0,104	0,17
Scope_H3	0,222	0,222	0,556
Scope_H4	0,357	0,318	0,325
Scope_H5	0	0	1
Вершини	Small	Large	
separat_1	0,575	0,425	
paths_2	0,657	0,343	
rollers_3	0,556	0,445	
spindle_4	0,893	0,107	
drive_5	0,4	0,6	
support_6	0,525	0,475	

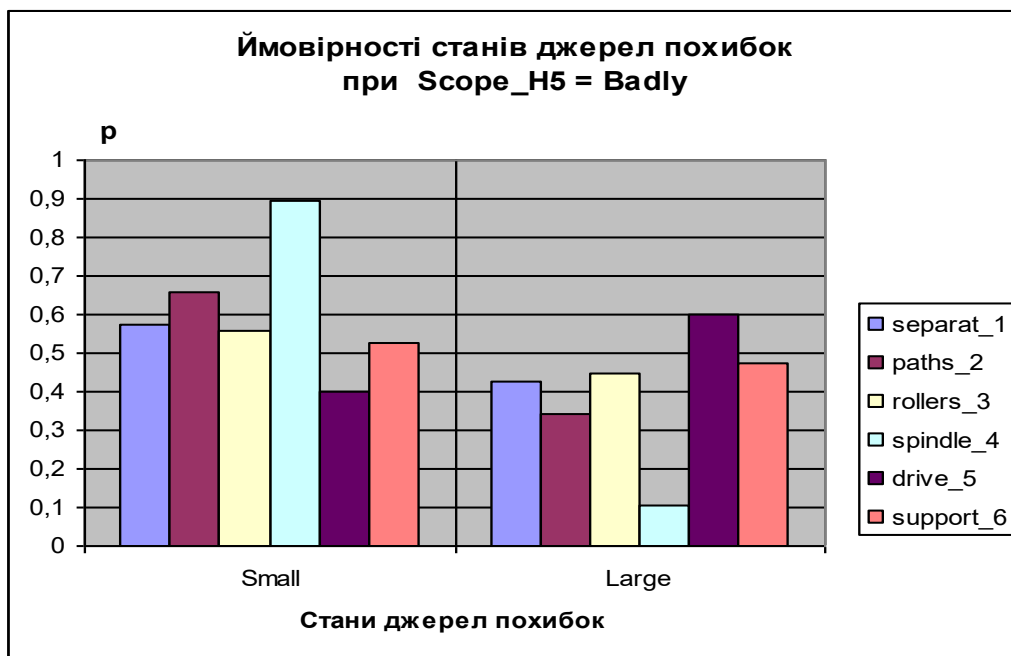


Рис. 4.21 - Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Score_H5 = «Badly»

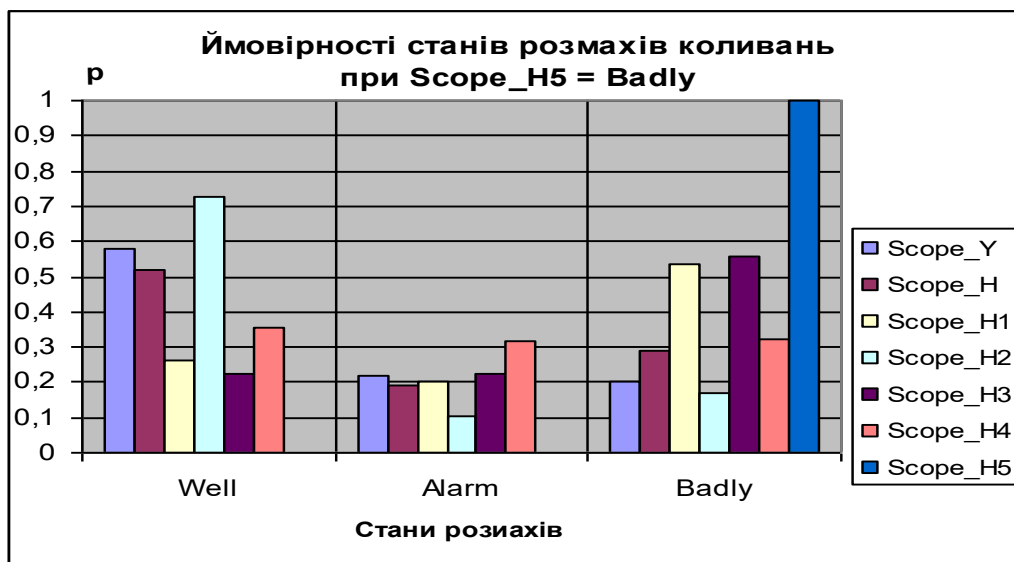


Рис. 4.22 - Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Score_H5 = «Badly»

Результати розрахунку для цього випадку показують, що при перевищенні допустимого рівня коливань Score_H5=«Badly» існує також досить значна ймовірність перевищення допустимого розмаху коливань для Score_H1 ($p_{\text{Badly}} = 0,533$) і Score_H3 ($p_{\text{Badly}} = 0,556$). Досить висока ймовірність впливу вібрацій з

боку приводу ($drive_5$, $p_{Large}=0,467$), а також супорту ($support_6$, $p_{Large}=0,475$). Ймовірності впливу інших джерел досить малі і знаходяться в межах $p_{Large} \leq 0,3$.

4.5 Висновки

В даному розділі описаний об'єкт діагностування - шпиндельна група верстата мод.16M05A, наведені його основні технічні характеристики, показники надійності. Основними результатами дослідження є:

1. Розроблена модель діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні і встановлені зв'язки погрішностей форми з параметрами шпиндельної групи верстата.

2. Розроблено методику і програмний модуль частотного аналізу биття шпинделя.

3. На основі проведеного Фур'є – аналізу кривої биття шпинделя встановлені діагностичні ознаки погрішностей форми при повздовжньому точінні і зв'язки по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками.

4. Розроблено методику і програмний модуль навчання мережі Байєса для діагностики шпиндельної групи.

5. Проведено побудову, навчання і аналіз мережі Байєса для діагностування шпиндельної групи верстата на базі програми VNetMaster.

6. З використанням розробленої мережі Байєса мереж по програмі VNetMaster проведено діагностику дефектів шпиндельної групи для трьох випадків встановлення діагностичних ознак.

7. Проведений аналіз результатів діагностування дозволяє враховувати отримані результати достовірними.

ВИСНОВКИ

Основний результат роботи полягає у підвищенні техніко-економічних показників і розширення ремонтоздатності верстатів шляхом комп'ютерного діагностування.

Проведені теоретичні дослідження і комп'ютерне діагностування шпіндельна група верстата мод.16M05A дозволили отримати наступні результати:

1. Обґрунтовано працездатність і можливість комп'ютерного діагностування верстатів з використанням програмних засобів автоматизації розрахунків загального призначення із застосуванням спеціальних програм підготовки даних і аналізу результатів.

2. Розроблена модель діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні і встановлені зв'язки погрішностей форми з параметрами шпіндельної групи верстата.

3. Розроблено методику і програмний модуль частотного аналізу биття шпинделя. На основі проведеного Фур'є – аналізу кривої биття шпинделя встановлені діагностичні ознаки погрішностей форми при повздовжньому точінні і зв'язки по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками.

4. Розроблено методику і програмний модуль навчання мережі Байєса для діагностики шпіндельної групи.

5. Проведено побудову, навчання і аналіз мережі Байєса для діагностування шпіндельної групи верстата на базі програми VNetMaster.

6. З використанням розробленої мережі Байєса мереж по програмі VNetMaster проведено діагностику дефектів шпіндельної групи для трьох випадків встановлення діагностичних ознак.

Отримані у роботі результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Розроблена методика встановлення діагностичних ознак погрішностей форми при повздовжньому точінні і зв'язки по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками може бути застосована при вібродіагностиці будь яких інших вузлів верстатів.

2. Розроблена методика навчання мережі Байєса при створенні моделі діагностики дозволяє відмовитися від процесів збирання – розбирання вузлів і тим самим суттєво зменшити часові й матеріальні витрати при вібродіагностиці будь яких вузлів верстатів.

3. Розроблена методика автоматизації комп'ютерної вібродіагностики на основі мереж Байєса є працездатною і такою, що забезпечує точність і достовірність результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безменов М. І. Основи програмування у середовищі Delphi : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХП», 2010. – 608 с.
2. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник за ред. Р.І. Сіліна. – Львів: Видавництво «Бескид Бід», 2008. – 448с.
3. Гордєєв О.Ф. Вибродіагностика верстата з використанням мереж Байєса. / О.Ф. Гордєєв, Р.М Полінкевич, Н.Т Зубовецька, Т.І. Четвержук // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. 2013. – Випуск 40. С. – 62-69.
4. Гевко Б.М. Технологія обробки на верстатах з ЧПК: навчальний посібник / Гевко Б.М., Матвійчук А.В. – Тернопіль: ТДТУ, 2004. – 131 с.
5. Давиденко В. І. Застосування різних методів оцінювання взаємозв'язку між факторами при побудові мереж Байєса [Текст] / Давиденко В.І., Трофименко Д.В., Свердел К.О. // Системний аналіз та інформаційні технології : сб. наук. праць по матеріалам XII міжнар. наук.-прак. конф.. – К:НТУУ “КПІ”, 2010. – С. 448.
6. Згуровський М. З. Основи системного аналізу [Текст] / Михайло Захарович Згуровський, Наталія Дмитрівна Панкратова. – К.: Видавнича група ВНУ, 2004. – 544 с.
7. Методи моделювання при дослідженні та проектуванні верстатів і технологічних систем. Навчальний посібник . / П.О.Захаров, О.Ф.Гордєєв.– Луцьк: ЛДТУ, 2004. – 213 с.
8. Муляр Ю.І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II: навчальний посібник / Ю.І. Муляр, С.В. Репінський. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 123 с.
9. Онофрейчук Н.В. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням: підручник/ Н.В. Онофрейчук. – Львів: Видавництво «Світ», 2019. – 252 С.
10. Jouffe L. New search strategies for learning Bayesian networks / Jouffe L. and Munteanu P. // Proc. of tenth international symposium on applied stochastic models and

data analysis (ASMDA 2001). – Compiègne (France). 12 – 15 June 2001. – Vol. 2. – P. 591-596.

11. Murphy K. A brief introduction to graphical models and Bayesian networks. [Text] / Technical report 2001-5-10, department of computer science, University of British Columbia, Canada, May 2001. – 19 p.

12. Murphy K. P. Dynamic Bayesian networks: representation, inference and learning. [Text] / A PhD dissertation, University of California, Berkeley. – 2002. – 225 p.

13. Neil M., Fenton N., Forey S. and Harris R. Using Bayesian belief networks to predict the reliability of military vehicles. [Text] / Computing and Control Engineering Journal. – 2001. – Vol.2. – P.11-20.

14. Nodelman U., Christian R. Shelton, and Daphne Koller. Learning continuous time Bayesian networks. [Text] / Proceedings of the nineteenth international conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI'03), Acapulco (Mexico), 7–10 August, 2003. – SF.: Morgan Kaufmann, 2003. – P. 451- 458.

15. Russell S. J. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd Edition)[Text] / Stuart J. Russel, Peter Norvig. – New Jersey.: Prentice Hall, 2002. – 1132 p.

16. Sebastiani P. Bayesian inference with missing data using bound and collapse / P. Sebastiani and M. Ramoni // Journal of Computational and Graphical Statistics. – 2000. – Vol. 9, № 4. – P. 779-800.

17. Spirtes, P., Glymour, C. and Scheines, R., Causation, prediction and search. [Text] / Adaptive computation and machine learning. – MIT press, January 2001. – 565p.

18. Zhang Z. Surrogate maximization (minimization) algorithms for AdaBoost and the logistic regression model / Z. Zhang, J. Kwok and D. Yeung // Proc. of the twenty-first international conference on machine learning (ICML 2004). – 2004. – 117p.

19. Zubovetska, N To the problem of developing a methodology for the frequency analysis of spindle runout/ Zubovetska, N., Fedorus, Y., Shvabyuk, V., Redko, R. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190966934>