

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

УДК 621.9.02

Четвержук Тарас Іванович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ
СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ**

Спеціальність 05.03.01
"Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти"

Дисертація

на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
кандидат технічних наук,
професор О.Ф. Гордєєв

Луцьк – 2015

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

- БМ – Байєсова мережа;
ММ – математична модель;
МРВ – металорізальний верстат;
НС – несуча система;
«НД» – діаграма «навантаження - деформація»
ОПР – особа, що приймає рішення;
СТДВ – система технічної діагностики верстату;
ТД – технічна діагностика;
ТДВ – технічна діагностика верстатів;
РД – ряди даних;
ПЕ – пружний елемент;
ТРП – технологічний робочий простір верстата;
ТС – технічна система;
ТПС – технологічна пружна система;
ТУЙ – таблиця умовних ймовірностей.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. СТАН ПИТАННЯ. ЦІЛІ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	14
1.1. Вплив деталей і стиків несучої системи верстата на точність і продуктивність обробки	14
1.2. Характеристики і моделювання деталей і стиків несучої системи верстата	18
1.2.1. Контактна взаємодія поверхонь стиків	18
1.2.2. Стикові деформації і контактна жорсткість	22
1.2.3. Вплив демпфування в стиках на динамічні характеристики верстата	30
1.3. Діагностика стану стиків верстата	33
1.4. Технологія віброакустичної діагностики верстатів	34
1.5. Моніторинг і діагностика вібрацій верстатів	38
1.6. Обґрунтування вибраного напрямку роботи і постановка задач дослідження	43
2. ПОДІБНІСТЬ І КОІНТЕГРОВАНІСТЬ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ДЕФОРМОВАНOSTІ СТИКІВ	46
2.1. Подібність процесів розвитку деформованості стиків	46
2.2. Коінтегрованість процесів розвитку деформованості стиків	51
2.3. Використання принципу подібності при діагностуванні деформаційних властивостей стиків	59
2.3.1. Загальні міркування	59
2.3.2. Тестування методу на еталонних діаграмах навантаження ...	60
2.3.3. Тестування методу при подібному деформуванні діаграм навантаження	63
2.4. Висновки по розділу 2	67
3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАЛАНСУ ДЕФОРМОВАНOSTІ СТИКІВ.....	68
3.1. Постановка задачі ідентифікації і моделювання деформаційних	

властивостей стиків металорізальних верстатів.....	68
3.2. Математична модель процедури визначення балансу зміщень і програмна реалізація методики	76
3.3. Структура і параметри задачі визначення балансу зсувів токарно-револьверного автомата	78
3.3.1. Постановка задачі	78
3.3.2. Структура задачі	80
3.3.3. Параметри задачі	81
3.4. Комп'ютерне моделювання похибки оброблення від зміщень у стику «направляючі каретки - горизонтальні направляючі станини» та інтерпретація результатів	88
3.5. Розрахунково-експериментальна ідентифікація динамічної податливості елементів пружної системи	98
3.6. Висновки по розділу 3	103
4. ВІБРОДІАГНОСТИКА СТИКІВ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА	105
4.1. Розробка моделі діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні	105
4.1.1. Встановлення зв'язків похибок форми з параметрами шпіндельної групи	105
4.1.2. Встановлення діагностичних ознак похибок форми	106
4.2. Частотний аналіз биття шпинделя і встановлення діагностичних ознак	107
4.2.1. Методика аналізу	107
4.2.2. Фур'є - аналіз кривої биття	110
4.2.3. Встановлення зв'язків по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками	115
4.3. Навчання мережі Байєса для діагностики шпіндельної групи ...	117
4.3.1. Побудова матриці навчання мережі	117
4.3.2. Побудова й аналіз мережі для діагностування шпіндельної	

групи верстата	121
4.3.3. Діагностика дефектів шпindelної групи з використанням розробленої мережі Байеса	122
Діагностика при небезпечному загальному рівні коливань	
4.3.3.1. Score_Y	122
Діагностика при небезпечному загальному рівні коливань	
4.3.3.2. Score_Y і Score_H1	127
Діагностика при перевищенні допустимого рівню коливань	
4.3.3.3. Score_H5	121
4.4. Висновки по розділу 4	129
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	131
5.1. Опис об'єкту дослідження і експериментальної установки	132
5.1.1. Установа для виміру навантажувальних характеристик ...	132
5.1.2. Установа для визначення модальних параметрів коливальної несучої системи верстата	137
5.2. Експериментальне визначення динамічної податливості елементів коливальної системи верстата	139
5.3. Експериментальна перевірка подібності і коінтегрованості процесів розвитку деформованості стиків	141
5.3.1. Експериментальна перевірка подібності	145
5.3.2. Експериментальна перевірка коінтегрованості	142
5.4. Висновки по розділу 5	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
Додаток А. Програма DefStyk моделювання деформацій стиків	167
Додаток Б. Програма STYK оцінки локальних зміщень \hat{y}_i в стиках	177
ДОДАТОК В. Програма STYK автоматизації процесу моделювання деформацій стиків	218

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	221
АВТОРСЬКЕ СВІДОЦТВО.....	224

ВСТУП

Актуальність. Стан несучої системи (НС) верстатів (МРВ) і її елементів, зокрема стиків, який визначається її статичною і динамічною жорсткістю, чинить великий вплив на правильне використання різального інструменту, впровадження прогресивних методів різання металів, підвищення точності і продуктивності оброблення. Якісні характеристики НС також нерозривно пов'язані з вібростійкістю технологічної системи верстат – деталь – інструмент, яка у свою чергу також впливає на термін служби деталей і вузлів верстата.

Важливою характеристикою верстата є статична жорсткість, яка визначається жорсткістю його деталей і контактною жорсткістю в стиках. Перша жорсткість може бути обчислена з достатнім ступенем точності по відповідних формулах опору матеріалів або теорії пружності для різних деталей, які розглядаються, як балки, пластини, плити, оболонки. В процесі експлуатації деформації цих деталей завжди пружні і звичайно лінійні по навантаженням.

Друга жорсткість – контактна – залежить від цілого ряду чинників, деякі з яких до теперішнього часу не вдалося встановити. Деформації поверхневих шарів в місцях контакту визначають фактичну площу торкання, необхідну для розрахунку сил тертя, оцінки впливу попереднього оброблення поверхонь на зношення, підбору зносостійких пар тертя, розрахунків міцності посадок, розрахунків теплового і електричного опору контактів і так далі. Характеристики контактної жорсткості змінюються в часі у міру фізичного зношення верстата або розрегулювання його елементів і визначаються великою кількістю випадкових чинників – технологічних і експлуатаційних. Мало передбачені явища зношення в рухомих стиках, які супроводжуються зміною їх інженерно-фізичних характеристик так само з великою часткою невизначеності. Звичайно контактні деформації нелінійні по навантаженням.

Для гарантованої точної надійності верстатного обладнання у процесі його експлуатації важливо забезпечити ефективну і надійну безрозбірну діагностику жорсткості елементів його несучої системи, зокрема стиків.

Ефективним експериментальним методом визначення динамічних характеристик НС верстата є аналіз мод коливань на основі результатів вимірювань і аналізу вимушених механічних коливань.

Перспективною є безрозбірна вібродіагностика. За її допомогою вирішується не тільки, які деталі втратили працездатність, але ідентифікується, які фактори і якою мірою визначають цю втрату.

При обліку усіх цих обставин стає ясною зростаюча актуальність розробки нових ефективних методів діагностування у верстатобудуванні.

Фундаментальні дослідження рухомих і нерухомих стиків несучих систем і динамічних характеристик верстатів виконані Демкиним М.Б., Рижовим Е.В., Д.Н. Решетовим, В.В. Камінською, З.М. Левиною, О.С. Проніковим, В.С. Хом'яковим, Н.А. Кочиневим, Ю.Н. Санкиним і іншими ученими.

Розрахунки вихідної точності верстата з урахуванням впливу елементів технологічної системи приведені в роботах В.В. Бушуева, Б.М. Базрова, В.В. Каминської, Д.Н. Решетова, В.Т. Портмана, Ф.С. Сабірова і ін.

Питанням надійності, стану основних елементів верстата, що змінюється з часом, присвячені фундаментальні роботи А.М. Дальського, О.С. Пронікова, а діагностиці інструменту і устаткування – роботи С.Н. Григор'єва, В.А. Синопальникова, М.П. Козочкіна і ін.

Великий внесок до вирішення перерахованих проблем внесли зарубіжні учені Н. Opitz, М. Weck, К. Teipel, М.М. Sadek, W.A. Knight, S.A. Tobias, W. Fishwick, М. Polacek, И. Тлусті і ін.

Дослідження в області вібродіагностики і модального аналізу несучих систем верстатів активно розвивають такі вчені як: Хом'яков В.С., Досько С.І., Сабіров Ф.С., Макаров В.М. (МГТУ «СТАНКИН»); Ю.И. Савинов, В.Б. Носиков (ФГУП «НПО «Техномаш»), В.И.Писарев («ЦСКБ-ПРОГРЕСС»); И.В. Голубев (ОАО «Станкозавод им. Орджоникидзе») і ін.

За останні роки був проведений цілий ряд робіт по вивченню деформаційних властивостей стиків верстатів (роботи Інституту машинознавства під керівництвом проф. И.У. Крагельського, проф. П.Е. Д'яченко і ін.) і жорсткості МРВ (роботи ЕНІМС під керівництвом проф. Д.Н. Решетова, дослідження проф. А.П. Соколовського і інших авторів).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування Луцького національного технічного університету відповідно до плану держбюджетної теми № 86-09 «Технологічне забезпечення якості робочих поверхонь кілець роликотітників на операціях безцентрового шліфування», затвердженої наказом МОН України № 1043 від 17.11.08р. (номер державної реєстрації 0109U001210) та є частиною наукової тематики науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування Луцького національного технічного університету за темою «Підвищення точності, надійності та довговічності машин та верстатів».

Мета роботи: розробка ефективних методів діагностування стану несучої системи металорізального верстату, зокрема нерухомих і рухомих стиків з урахуванням процесів зношування і прироблення.

Для досягнення цієї мети були поставлені та **вирішувалися наступні задачі:**

1. теоретично і експериментально обґрунтувати припущення про подібність розвитку процесів зміни і коінтегрованість деформаційних властивостей стиків токарних верстатів;

2. розробити та апробувати методи і програмно-математичне забезпечення для експериментально-розрахункової оцінки і діагностики деформаційних властивостей стиків;

3. провести моделювання діагностики динамічних властивостей елементів несучої системи верстату на основі розрахунково-експериментального модального аналізу;

4. побудувати матричні моделі вібраційної діагностики елементів несучої системи верстату з використання методів на основі імовірнісних ланцюгів Байеса;

5. розробити моделі Фур'є-аналізу кривої биття шпindelного вузла токарного верстату і встановити зв'язки між джерелами похибок і діагностичними ознаками;

6. провести експериментальні дослідження, щодо перевірки основних положень теоретичних розробок.

Об'єкт дослідження – несучі системи металорізальних верстатів.

Предмет дослідження – фізико-механічні та енергетичні процеси в елементах несучої системи верстата, зокрема у нерухомих і рухомих стиках, і їхній вплив на статичні та динамічні характеристики верстата.

Методи дослідження: методи динаміки верстатів, методи планування та проведення експериментальних досліджень, теорія коливань, гідродинаміка, методи диференціального та інтегрального числення, основні положення дискретної математики.

Методики, що розробляються, базуються на припущенні про подібність і коінтегрованість розвитку процесів зміни деформаційних властивостей стиків, а також методах частотного аналізу, методів розпізнавання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. вперше обґрунтовано подібність розвитку процесів зміни деформованості стиків і припущення про функціональний зв'язок (коінтегрованість) між деформаційним процесом u , який вимірюється, і прихованим процесом Φ , який треба діагностувати. Подібність процесів необхідно розглядати в середньому, а його межі визначаються допустимою середньою похибкою σ , або її варіацією var_σ ;

2. вперше обґрунтовано, що регресори і графіки зсувів від силових чинників в стику по координатах верстата можуть служити деформаційним паспортом вузла верстата, на основі якого можна розраховувати і прогнозувати його вплив на точність обробки;

3. вперше запропоновано методику моделювання і автоматизації процесів ідентифікації деформаційних характеристик стиків металорізальних верстатів по їх характеристиках в технологічному робочому просторі верстата;

4. вперше подано методику діагностування елементів несучої системи верстату на основі побудови і автоматизованого навчання мережі Байєса;

5. вперше розроблено і апробовано методику діагностики динамічної податливості елементів несучої системи верстату на основі імпульсного модального аналізу.

Практична цінність одержаних результатів. 1. Розроблено методику і програмне забезпечення моделювання і автоматизації процесів ідентифікації деформаційних характеристик стиків МРВ по їх характеристиках в технологічному робочому просторі верстата на основі подібності та коінтегрованості процесів деформованості стиків. 2. Розроблено методику і програмне забезпечення діагностування елементів несучої системи верстату на основі побудови і автоматизованого навчання мережі Байєса. 3. Розроблено методику і програмне забезпечення ідентифікації параметрів коливальної несучої системи верстату на основі імпульсного модального аналізу.

Результати роботи впроваджені при діагностуванні стану верстатів на АТ «СКФ Україна» (публічне) (м. Луцьк), ДП «Автоскладальний завод №1» (м. Луцьк). Результати досліджень також використовуються в навчальному процесі на кафедрі КПВ та ТМ ЛНТУ при викладанні курсів лекцій «Металообробне обладнання» і «Обладнання та транспорт механообробних цехів», а також в курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Автором дисертації особисто отримані наступні наукові та практичні результати: 1) визначені основні вимоги щодо математичного забезпечення процесів ідентифікації деформаційних характеристик стиків МРВ; 2) розроблений принцип визначення ознак подібності і коінтегрованості процесів розвитку деформованості стиків; 3) розроблено методику діагностування елементів несучої системи верстата на основі побудови і автоматизованого навчання мережі Байєса; 4) розроблено

методику і програмне забезпечення ідентифікації параметрів коливальної несучої системи верстату на основі імпульсного модального аналізу; б) проведені експериментальні дослідження. У роботах, які виконанні у співавторстві, автору належать ідеї, пов'язані з програмною ідентифікацією параметрів і їх статистичною оцінкою.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на: науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ЛНТУ, Луцьк 2011-2014 р.р.; міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями та перспективи розвитку технологій обробки та обладнання у машинобудуванні «Механообробка. СевНТУ, Севастополь 2013р.; IV міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування». Луцький НТУ, Луцьк-Світязь, 2013р.; XX міжнародній науково-технічній конференції «Машиностроение и техносфера XXI века». ДонНТУ, Донецьк, 2013р.; III міжнародній науково-практичній конференції ТК-2014. «Прогресивні напрями розвитку технологічних комплексів». Луцький НТУ, Луцьк-Світязь 2014р.; XIV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих» СумДУ, Суми 2014р. У повному обсязі робота доповідалася й отримала позитивний відгук на розширених засіданнях науково-технічних семінарів кафедри «Комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування Луцького національного технічного університету (2014-2015рр.).

Публікації. Основні результати роботи опубліковані в 16 наукових працях, з них у фахових виданнях – 12 (2 – в закордонних виданнях, 1 – одноосібна), 3 тези наукових конференцій, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (122 найменування) і трьох додатків на 49 сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 172

сторінки основного тексту, у тому числі 83 рисунки, 24 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ. ЦІЛІ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Стан несучої системи (НС) верстатів (МРВ) і її елементів чинить великий вплив на правильне використання різального інструменту, впровадження прогресивних методів різання металів, підвищення точності і продуктивності оброблення. Основними характеристиками НС і її елементів, зокрема рухомих і нерухомих стиків, є статична жорсткість і демпфуюча здатність. Якісні характеристики НС також нерозривно пов'язані з вібростійкістю технологічної системи верстат - деталь - інструмент, яка, у свою чергу, впливає на термін служби деталей і вузлів верстата.

Для гарантованої точнісної надійності і необхідної продуктивності верстатного обладнання в процесі його експлуатації важливо забезпечити ефективну і надійну безрозбірну діагностику елементів його несучої системи, зокрема стиків.

1.1. Вплив деталей і стиків несучої системи верстата на точність і продуктивність обробки

Відомо, що частка контактних деформацій рухомих і нерухомих стиків в балансі пружних зміщень, що виникають у верстаті, залишається істотною (до 70%) при всіх видах його навантаження [8]. Аналіз деформацій, приведених до зони різання, показує, що в самих несучих конструкціях переважають контактні деформації стиків. Наприклад, для верстатів фрезерно-розточувальної групи їх частка доходить до 70% від загального рівня деформацій [46].

Величина внеску конкретного стику в баланс пружних переміщень визначається безліччю чинників, частину яких можна віднести до компоновальних, а саме [92]: 1) положення стику щодо точки оброблення і центрів тяжіння елементів компоновки; 2) кути нахилу площини стику щодо напрямів дії сили різання і ваги елементів компоновки; 3) взаємне розташування і основні розміри тих стиків, що окремо напрямляють, або

майданчиків контакту в стиках; 4) розміщення (щодо напрямної) точки додавання тягового зусилля до рухомого елемента стику.

Від перерахованих чинників в значній мірі залежать величина і розподіл тиску на гранях напрямних, а також сумарна сила тертя в рухомих стиках. Вони закладаються ще на етапі ескізного проектування при пошуку кращої концепції конструкції верстата серед безлічі альтернативних варіантів.

Іншу групу чинників визначають фізико-механічні властивості поверхонь стиків. Вплив цих чинників на вихідні параметри стиків, а через них – на точність і точнісну надійність всього верстата може виявитися доволі істотним. На величину похибки деформація стиків впливає більшою мірою, чим деформація його деталей і контактна деформація. Жорсткість стику залежить не тільки від величини мікронерівностей обробленої поверхні стику, але і від методу обробки [17].

Важливу роль має своєчасне діагностування стану пружної системи і окремих елементів верстата, зокрема стиків, при експлуатації верстата. Технологічна система «верстат - пристосування - інструмент - заготовка» містить безліч деталей і стиків, зокрема паралельно з'єднаних. В цьому випадку для своєчасного виявлення і усунення можливих дефектів необхідне ефективне технічне діагностування «слабкої» ланки.

При випробуваннях адекватна оцінка працездатності будь-якої машини може бути зроблена тільки на основі глибокого аналізу тих умов, в яких машині належить працювати. Для універсального металорізального верстата умови експлуатації можуть бути вельми різноманітні і залежать від великої кількості чинників, що визначають межі працездатності. Тому дослідник повинен бути озброєний методологією, що дозволяє йому на основі інформації про режими роботи випробовуваного верстата вибрати умови випробувань і критерії оцінки.

В роботах Ю.Д. Врагова [8] використовується поняття робочого простору компоновки верстата, всередині якого розглядаються статичні деформації і навантаження, зв'язані геометричними співвідношеннями. Таке уявлення корисне при порівняльному аналізі компоновок при проектуванні. При

випробуваннях роль динамічних деформацій вузлів, розташованих в робочому просторі доволі велика і не може ігноруватися. При вирішенні проблеми використовується також поняття багатофакторного технологічного робочого простору, який включає не тільки геометричний простір, але і характеристики оснащення, ріжучого інструменту і оброблюваних деталей, що визначають процес оброблення.

Технологічним робочим простором (ТРП) верстата Ф.С. Сабіровим [71] запропоновано називати багатофакторний простір, що об'єднує підпростори заготовки, різального інструменту і пристосувань для їх закріплення при можливих положеннях рухомих вузлів верстата, що несуть настановні місця для закріплення цих пристосувань. Особливістю цього ТРП є його наповненість інерційно-дисипативно-пружними елементами, силова навантаженість і наявність процесу різання, яке визначається різноманіттям умов оброблення деталей на верстаті. Розбиття ТРП на елементи дозволяє досліджувати його по частинах з подальшим об'єднанням в єдину систему.

Через різну компоновку і конструкцію верстатів, якість їх виготовлення і зборки, умов роботи, їм властива анізотропія характеристик в ТРП. При цьому характеристики, які пов'язані з продуктивністю і точністю, змінюються у міру фізичного зношення верстата або розрегулювання його елементів.

Різні підходи до дослідження складної статичної і динамічної системи верстата по частинах використовувалися в роботах В.С. Хом'якова, Е.В. Хлебалова, Н.А. Кочинева, А.І. Камишева, С.А. Терентьева, А.В. Бичкової, Е.А. Курдгелія, В.М. Чупріни і інших, в яких розрахункова модель пружної системи верстата представлялася такою, що складається з основної і декількох зв'язаних підсистем. Вирішуючи системи рівнянь для кожної підсистеми і описуючи рівняння зв'язку підсистем, визначають статичні і динамічні характеристики єдиної системи.

Першою роботою у верстатобудуванні, що реалізовує цей підхід стосовно автоматизованих розрахунків пружно-деформованого стану з'єднань корпусних

деталей верстатів, є спільна робота В.С. Хом'якова і І.В. Тарасова [72, 82, 91, 92].

У згаданих роботах використовуються розрахункові характеристики, як для основної системи, так і для підсистем. У цих моделях використання експериментальних характеристик підсистем не представлялося можливим.

Проведений в роботі [71] аналіз привів до розробки методології, що дозволяє швидше і точніше оцінювати характеристики в ТРП, що полягає в розумному поєднанні експериментального і розрахункового підходу до оцінки характеристик і діагностування стану пружної системи верстата.

Аналіз вище зазначених робіт показує, що використовувані в даний час методики розрахунку параметрів якості оброблення деталей, не завжди дають задовільний результат, оскільки не повністю враховують вплив складної багатокоординатної пружної системи верстата на статичну і динамічну жорсткість технологічної системи верстат – приспособлення – інструмент – заготовка і практично не враховують непостійність характеристик в робочому просторі верстата.

Складність динамічних розрахунків пружних систем верстатів визначається багатовимірністю моделі і невизначеністю пружно-дисипативних параметрів. При виконанні динамічних розрахунків доводиться стикатися з ситуацією, коли із-за недостатності експериментальних даних модель виходить неадекватною, або йти на спрощення моделі, що знижує точність результатів. Отже, необхідна методологія, що дозволяє швидше і точніше оцінювати характеристики в ТРП, яка полягає в розумному поєднанні експериментального і розрахункового підходу до оцінки характеристик і діагностування стану пружної системи верстата.

Аналіз різних підходів до вивчення деформацій пружної системи (ПС) верстата в ТРП дозволяє відзначити наступне:

1) поелементний розгляд (декомпозиція) ПС верстата [71] з подальшим об'єднанням елементів в систему (синтез) є одним з продуктивних підходів системного аналізу, але такий прийом вносить похибки на обох етапах;

2) система технологічних обмежень продуктивності по суті є системою технологічних обмежень і ніяк не регламентує точність визначення деформацій ТПС;

3) емпіричні моделі можуть застосовуватися для найбільш типових умов експлуатації, до того ж вони мають обмежену цінність лише для конкретного технологічного об'єкту;

4) всі розглянуті підходи не відповідають на одне важливе питання – який внесок дає кожен елемент технологічної системи в баланс жорсткості пружної системи у міру зношення?

Тому в даному дослідженні запропонована методика визначення балансу зсувів окремих елементів ПС в ТРП верстата за інформацією про деформаційні характеристики стиків. Автоматизація визначення технологічної надійності з'єднань вузлів металорізальних верстатів, їх досяжні і перспективні техніко-економічні характеристики є актуальним завданням.

1.2. Характеристики і моделювання деталей і стиків несучої системи верстата

1.2.1. Контактна взаємодія поверхонь стиків

Зносостійкість, контактна жорсткість, корозійна стійкість, втомна міцність стиків залежать від топографічних параметрів поверхонь, властивостей зв'язаних матеріалів і прикладеного навантаження.

Дослідження показують, що більше 80% випадків виходу з ладу машин і механізмів обумовлено процесами, що відбуваються в зоні контакту деталей. Основними контактними характеристиками, що забезпечують експлуатаційні властивості з'єднань деталей машин, є зближення шорстких поверхонь, відносна площа контакту і об'єм зазорів в стику, які знаходяться в певній взаємозалежності і визначаються параметрами макро- і мікрогеометрії, а також величиною і розподілом поверхневої напруги.

Стик з'єднань деталей машин є складною технічною системою як з погляду опису шорстких поверхонь, так з погляду механіки контактної взаємодії. Тому для визначення експлуатаційних показників використовуються як експериментальні методи, так і методи математичного моделювання і їх різні поєднання.

Вивченню питання про площу фактичного контакту в стику присвячена велика кількість досліджень, які можна розділити на три групи залежно від передбачуваного характеру деформацій нерівностей в стику: пружного, пластичного і пружно-пластичного [70]. При аналізі рухомих і нерухомих стиків НС верстатів доречно брати до уваги тільки пружні деформації [21, 22].

Спочатку дослідження контактних явищ у верстатах проводилися на зразках з малою площею контакту, до 30 - 50 мм². Експериментально були встановлені залежності між контактними переміщеннями, нормальним тиском і дотичною напругою, виявлений вплив мікро- та макрогеометрії та мастила на поведінку зразків з різних металів [7, 14, 46, 67, 70 і ін.].

В даний час загальновизнаним є уявлення про дискретний характер контакту поверхонь [46], основні положення якого широко використовується в трибології для вирішення контактних завдань. Шорсткість поверхні грає велику роль в рухомих з'єднаннях верстатів, в значній мірі впливаючи на тертя і зношення поверхонь, що труться. При недостатньо гладких поверхнях зіткнення між ними відбувається в окремих точках при підвищеному питомому тиску, внаслідок чого мастило видавлюється, порушується безперервність масляної плівки, і створюються умови для виникнення напівсухого і навіть сухого тертя.

В.А. Журавльов, І.В. Крагельський, П.Е.Дьяченко, І.Т. Гусев, Н.Б. Демкин, А.Г. Суслов, Е.В. Рижов, В.В. Шелофаст, І.Г. Горячева розробляли математичні моделі пружного контакту шорстких поверхонь. Більшість названих дослідників прагнули отримати модель, що придатна як для дослідження жорсткості, так і зносостійкості, тобто придатну для вирішення завдань не тільки жорсткості.

Одночасно з описаними вище дослідженнями широкі експериментальні і теоретичні дослідження процесів контакту твердих шорстких тіл були проведені з використанням і іншого підходу, розробленого І.В.Крагельським і його учнями. Базові експериментальні результати і теоретичні розробки, на основі яких були створені розрахункові методи, були отримані І.В. Крагельським, Н.Б.Демкиним, Н.М. Міхиним, В.С. Комбаловим, Е.В.Рижовим [18, 39 - 43, 69, 70] і ін. Широкого використання в практиці розрахунків верстатів даний підхід в даний час не отримав внаслідок його великої трудомісткості.

Останні чотири десятиліття характеризуються інтенсивним розвитком чисельних методів теорії пружності, методів кінцевих і граничних елементів [4, 9, 52, 59, 77]. Модифікації цих методів знаходять застосування при рішенні і контактних завдань [10, 52, 108 - 109 і ін.]. До теперішнього часу вони програмно реалізовані в широко поширених універсальних пакетах, таких як WinMashin, Ansis, Nastran, Katia, Nisa, Compas РИПАК, ИСПА, ТПС, ГИФТС, СПРИНТ, МАКС і др. Ці пакети дозволяють виконувати розрахунки конструкцій машин як власних деформацій корпусних деталей, так і контактних деформацій в їх з'єднаннях. Проте, слід відмітити, що вказані сучасні програмні комплекси поки не забезпечують при розрахунках конструкцій верстатів обліку, що несуть, в повному об'ємі специфіки верстатних контактних завдань, пов'язаних з наявністю зазорів в з'єднаннях корпусних деталей і складною мікро- і макрогеометрією контактних поверхонь. Тому при такій постановці питання вони можуть грати лише допоміжну роль.

Ольшевским А.А. зроблена спроба розробити універсальну методикку вирішення контактних завдань для тіл довільних геометричних форм з врахуванням шорсткості поверхонь контакту методом кінцевих елементів [56, 57]. Параметри, що характеризують податливість шорсткого шару, визначаються при дослідженні контакту малих фрагментів реальних тіл з шорсткими поверхнями в базових моделях. Базові моделі будуються на підставі даних профілометрії поверхонь реальних деталей, що дозволяє розглядати

шорстку поверхню, не вводячи серйозних допущень. Відомості про податливість, отримані на базових моделях, використовуються при рішенні прикладної задачі. Таким чином вдається одночасно враховувати макрогеометричні особливості досліджуваного об'єкту і його мікрогеометрію в зоні контакту, об'єднуючи в рамках розробленої методики рішення принципи обох напрямів у вирішенні контактних завдань. При рішенні контактної задачі для базових моделей виявилось можливим досліджувати закономірності зміни плям контакту при збільшенні навантаження, а також оцінювати фактичну площу контакту залежно від номінального тиску на поверхні контакту.

Прагнення уточнити рішення задачі реальної взаємодії контактуючих поверхонь деталей і вузлів приводить до представлення схеми контакту дотичних поверхонь моделями кінцевих елементів (МКЕ) трьох типів, розглянутих в роботі [35].

Кожна з моделей, побудованих системою лінеаризованих математичних моделей, адекватна початковому нелінійному об'єкту тільки при відповідних конкретних значеннях заданого навантаження. Для проведення статичних розрахунків програмно реалізовані чисельні методи прямого і оптимізаційного розрахунків контактних систем. Розрахунки виконуються при обліку відомих експериментально встановлених нелінійних законів контактної взаємодії твердих шорстких тіл в нормальному і тангенціальному напрямках. Аналіз взаємодії двох тіл що знаходяться під дією довільного навантаження, поверхні яких утворені реальним мікрорельєфом показує, що мікровиступи вступають в контакт один з одним не тільки вершинами, але і бічними сторонами [35]. Запропонована модель може бути ефективною при використанні експериментальних даних про стан контактуючих поверхонь, наприклад даних, приведених в роботі Е.В.Рижова [46]

Останнім часом для опису мікрогеометрії поверхонь часто використовують фрактальну модель, параметри якої постійні для всіх масштабів мікронерівностей [12]. При визначенні контактних характеристик отримані результати, що суперечать дискретній моделі шорсткості і

положенням механіки контактної взаємодії, на яких вона ґрунтується: малі плями контакту деформуються пластично, великі – пружно.

1.2.2. Стикові деформації і контактна жорсткість

Деформації стиків грають значну роль в загальному балансі жорсткості металорізальних верстатів і їх вузлів, що вперше було відмічене ще К.В. Вотіновим [7]. Докладні експериментальні дані по впливу режимів і методів обробки на деформаційні властивості стиків отримані Е.В. Рижовим [69].

Загальні пружні переміщення супортів, повзунів і інших деталей, що переміщуються, в балансі пружних переміщень верстатів складають досить істотну частину. Так, в карусельних двохстійкових верстатах пружні зсуви повзунів в горизонтальному напрямі складають до 50-70% загальних зсувів, приведених до різця [27]; у токарних верстатах пружні зсуви: супортів складають 25-50%. У свою чергу, зсуви внаслідок контактних деформацій в направляючих складають значну частину загальних пружних зсувів повзунів і супортів. Так, наприклад, в супортах токарних верстатів приведені до різця контактні деформації в направляючих складають до 80-90% загальних переміщень супорта, а у повзунів поперечно-стругальних, довбальних, карусельних верстатів приведені до різця деформації по довжині направляючих складають 40-70% загальних пружних зсувів повзунів у різця.

Початок експериментальним дослідженням контактної жорсткості плоских стиків поклав К.В. Вотінов в 1940 р. Важливі результати отримані А.П. Соколовським, Д.Н. Решетовим, З.М. Левіной, І.Т. Гусевим, В.В. Камінської, Н.Б. Демкиним, Е.В. Рижовим, В.І. Островським, А.С. Лапідусом, Е.А. Майорової, Г.Е. Чихладзе, А.Г. Суслон, Я. Піком. У цих роботах встановлено, що контактне зближення зв'язане статичною залежністю з контактною напругою. При першому навантаженні отримане контактне зближення в три - чотири рази більше, чим при подальших внаслідок пружно-пластичної деформації мікронерівностей. Подальші вантаження супроводжуються, як

правило, пружними деформаціями мікронерівностей. Показник ступеня в отриманій залежності А.П. Соколовський приймав рівним 0,4, З.М. Левіна і Д.Н. Решетов – 0,5, Е.В. Рижов не обумовлював його числового значення. Всі автори відзначали вплив шорсткості поверхонь на контактну жорсткість, але більшість з них приводила різні числові значення цього впливу, що в значній мірі пояснюється тим, що досліджувалося контактне зближення поверхонь різних розмірів і з різних матеріалів.

Визначення контактної жорсткості принципово можливо шляхом безпосередніх експериментів і шляхом розрахунків на основі вимірювання або завдання мікро- і макрогеометрії поверхонь і фізико - механічних властивостей поверхневих шарів. Проте розрахункове визначення контактної жорсткості для реальних поверхонь надзвичайно важке і виконане тільки для простих моделей [27]. Застосування вказаних і інших аналогічних рішень для моделей щодо розрахунків машин в даний час є проблематичними, оскільки вони ґрунтуються на ряду припущень і на експериментальних даних, отримати які складніше, ніж провести безпосередньо випробування на жорсткість.

Подальший розвиток методів технічних розрахунків верстатних з'єднань, розроблених Д.Н. Решетовим і З.М. Левіною, отримали в роботах В.І. Островського [58], В.В.Каминської і І.І. Равве [28].

А.П. Соколовским [78 - 80] вперше була отримана аналітична залежність між тиском і зближеннями в стику. Надалі ця залежність була підтверджена експериментальними дослідженнями Е.В. Рижова [69, 70].

Розрахунок на жорсткість супортів, повзунів і столів ґрунтується на прямих експериментах по контактній жорсткості на моделях і вузлах машин. При розрахунку приймається припущення про те, що нормальні стиснення поверхневих шарів δ пропорційні нормальному тиску σ

$$\delta = k \sigma, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт контактної податливості.

При цьому для коефіцієнтів контактної податливості мають місце такі співвідношення: $k_z = \delta/\sigma$ – коефіцієнт контактної податливості при навантаженні центральною силою Q ; $k_a = \sigma J/M$ – коефіцієнт контактної податливості при навантаженні стику моментом M і тією ж центральною силою Q ; J – момент інерції площі стику.

Прийняті допущення лежать в основі більшості технічних розрахунків податливості стиків.

Для більшості технічних розрахунків додатково приймаються ще два допущення [27]: 1) жорсткість поверхневих шарів на різних гранях направляючих однакова; 2) тиск і деформації по ширині граней розподіляються рівномірно.

Після накопичення необхідного експериментального матеріалу при необхідності даний розрахунок легко може бути поширений на випадок різної жорсткості поверхневих шарів окремих граней. Коефіцієнт контактної податливості k визначався при цьому експериментально. Підтвердженням правильності прийнятих допущень є близькість коефіцієнтів k для різних форм і розмірів направляючих і при різних видах навантажень.

Велика кількість оброблених експериментів, виконаних в ЕНИМС, дозволило дати рекомендації по вибору величини коефіцієнта δ_0 залежно від розмірів і умов роботи направляючих.

Випробування, виконані в ЕНИМС, на лабораторних зразках, показали наступне [27]:

1. Величина розкиду коефіцієнтів контактної податливості залежить від середнього тиску на контактуючих поверхнях, розмірів стиків (що назване "масштабним чинником"), їх орієнтації в складних з'єднаннях, якості виготовлення контактних поверхонь з'єднань і ряду інших чинників.

2. Наявність і кількість мастила в стиках при статичній ексцентричній деформації не позначається істотно на величину коефіцієнтів контактної податливості. При центральному навантаженні наявність мастила підвищує жорсткість стиків з шліфованими і шабреними поверхнями до 20%, оскільки

масло заповнює замкнуті об'єми, що утворюються мікронерівностями. Такий же результат отриманий І.Т. Гусевим [13, 14].

3. Жорсткість не змащених стиків при коливаннях і статичній деформації однакова і не залежить від частоти коливань.

4. Жорсткість змащених стиків при коливаннях вища, ніж при статичній деформації, до 1,5-2 разів і зростає із збільшенням кількості і в'язкості мастила в стиках та із зменшенням початкового тиску.

5. Коефіцієнти контактної податливості стиків чавун – чавун, сталь – сталь і чавун – кольоровий сплав (бронза ОЦС 6-6-3, ЦАМ 10-5) близькі між собою.

6. Різниця в коефіцієнтах контактної податливості залежить від виду навантаження. Найбільша різниця в коефіцієнтах контактної податливості – при центральному навантаженні, та із збільшенням ексцентриситету ця різниця зменшується.

З погляду розрахунку всі з'єднання корпусних деталей верстатів можна розділити на дві групи [27]:

1. З'єднання, в яких власна жорсткість деталей на порядок вища за жорсткість поверхневих шарів (супорти токарних, карусельних, довбальних і інших верстатів, консолі і головки шпинделів фрезерних верстатів, короткі столи і т. п.), при цьому власними деформаціями деталей можна нехтувати і розглядати відносний поворот і зсув деталей як твердих тіл за рахунок деформацій поверхневих шарів. При цьому приймається, що тиск і, отже, деформації по довжині направляючих розподіляються по лінійному закону.

2. З'єднання, в яких власна жорсткість однієї з деталей, що сполучаються, співрозмірна з жорсткістю поверхневих шарів (повзуни карусельних, поперечно-стругальних і довбальних верстатів, супорти і довгі столи поздовжньо-стругальних верстатів і т. д.). При цьому, як правило, жорсткість однієї з деталей, що з'єднується, на порядок вище за іншу і при розрахунку можна користуватися теорією балок і плит на пружній основі.

З використанням методичних розробок Д.Н. Решетова [19] і на основі результатів аналізу експериментальних досліджень В.В.Камінської, Д.Н. Решетова і З.М. Левіної [19, 27, 28]. були розроблені спрощені методи технічних розрахунків контактних деформацій в різних затягнутих і рухомих з'єднаннях деталей машин, зокрема, верстатів.

Основні положення цих методів такі.

1. Пружні переміщення в стиках при навантаженні, що швидко змінюється, відрізняються від переміщень при статичному навантаженні, що тривало діє. Це пояснюється дією сил тертя на гранях напрямних, а також підвищеним опором витискуванню масла.

2. Сили тертя перешкоджають зростанню деформації при зростанні навантаження і зменшенню деформацій при зменшенні навантаження. При постійних навантаженнях сили тертя, що тривало діють, знімаються. Пружні переміщення при дії сил тертя менші, ніж у разі, коли сили тертя знімаються.

3. Наявність зазорів не позначається істотно на переміщеннях супортів, якщо планки не приймають участі в роботі. Під час переходу тиску з частини довжини напрямних на планки наявність зазорів зменшує працюючі довжини напрямних і планок, тим самим викликає збільшення пружних переміщень.

Моделювання стику між базовими деталями, як правило, здійснюється пружинними елементами, що мають певну жорсткість і демпфування. Поверхневі шари металу можна розглядати як тонкі пружні прокладки між деталями, що з'єднуються [27], оскільки деформації поверхневих шарів багато разів вищі, ніж деформації матеріалу на деякій відстані від стику. Тому гіпотеза про залежність тиску від зближення тільки в даному перетині для стиків деталей верстатів досить добре відображає сенс їх роботи.

Прикладом моделювання стику тонким шаром матеріалу, що має пружні і демпфуючі властивості реального стику, є звичайно – елементна оболонкова модель плоского стику, приведена в роботі Ю.В. Киріліна [30]. На підставі математичної моделі пружної деформації мікронерівностей, хвилястості і макровідхилень була розроблена методика розрахунку контактної жорсткості

плоского стику при повторному навантаженні, в якій контактне зближення обчислюють по значеннях параметрів, що задаються конструктором при розробці ним креслень деталей.

Аналіз процесів, які відбуваються при стикових деформаціях, дозволив дати ряд аналітичних формул за їх розрахунком [27]. Ряд формул аналогічного призначення були отримані Н.Б. Дьомкіним [18], Е.В. Рижовим [69, 70], Л.П. Медвежим, И.Т. Гусєвим [14].

Вивченням впливу мастила на контактні деформації займалися І.Т. Гусєв [14], Д.Н. Решетов і З.М. Левіна [46], І.В. Крагельський [39 - 42] і ряд інших дослідників. В результаті цих робіт було встановлено, що зближення в стику з мастилом мало відрізняються від зближень в не змащеному стику. При центральному навантаженні з індустриальними маслами статична жорсткість змащених стиків зазвичай більше на 10 - 15% жорсткості не змащених. При ексцентрично прикладеному навантаженні наявність мастила майже не впливає на жорсткість. Виключення представляють стики з низькою шорсткістю контактних поверхонь (чисто шліфованих, притертих, доведених і тому подібне), в яких спостерігається спливання верхніх зразків на шарі мастила.

Експериментально було встановлено [27], що дотична напруга, що виникає на контактних поверхнях з'єднань, є функцією не тільки зсувних навантажень, але і тиску в стиках. Проте, аналітичного виразу для цієї функції отримано не було. Одній з перших робіт, де ця функція була визначена, є сумісна публікація Н. Бэка (N. Bask), М. Бурдекина (M. Burdekin) і А. Кавли (A. Cawley).

У цих дослідженнях контакти деталей, що сполучаються, які при розрахунках вважаються такими, що не деформуються, розглядаються на рівні взаємодії не окремих мікрОВиступів, а їх сукупності. При цьому враховується складний характер навантаження, а також наявність реальних похибок обробки, які визначаються характером макро- і мікрогеометрія контактуючих поверхонь.

Подальший розвиток методів технічних розрахунків верстатних з'єднань, розроблених Д.Н. Решетовим та З.М. Левіною [27, 46], отримали в роботах В.І. Островського [58], В.В. Камінської та І.І. Равве [28].

Використовуючи основні положення роботи [46] і нелінійну залежність (1.2), В.І. Островський запропонував методику розрахунку направляючих ковзання прямолінійного руху [58]. Результати розрахунків, які виконані по цій методиці, добре узгоджувалися з експериментальними даними. Проте, із-за великої трудомісткості рахунку і внаслідок того, що методика не охоплювала всієї різноманітності направляючих ковзання, використаних у верстатах, вона не набула широкого поширення.

Особливість підходу В.В. Камінської і І.І. Равве до розрахунку направляючих [28] полягає у використанні для отримання умов їх статичної рівноваги принципу віртуальних переміщень. При такому підході необхідна і достатня умова статичної рівноваги системи, що розраховується, співпадає з умовою стаціонарності силової функції, яка визначається її потенційною енергією.

Одночасно з описаними вище дослідженнями широкі експериментальні і теоретичні дослідження процесів контакту твердих шорстких тіл були проведені з використанням і іншого підходу, розробленого І.В. Крагельським і його учнями. На відміну від підходу, що витікає від К.В. Вотінова, А.П. Соколовського, Д.Н. Решетова і З.М. Левіної, він полягає в проведенні технічних розрахунків по моделях шорстких поверхонь, імітованих наборами інденторів різної форми: сферичною, сегментною, циліндричною, стрижневою, пірамідальною, еліпсоїдною і ін. Основними поняттями, які використовуються при даному підході, є «номінальна», «фактична» і «контурна» площі торкання. Базові експериментальні результати і теоретичні розробки, на основі яких були створені розрахункові методи, були отримані І.В. Крагельським, Н.Б. Дьомкиним, Н.М. Міхиним, В.С. Комбаловим, Е.В. Рижовим і ін. Широкого використання в практиці розрахунків верстатів даний підхід в даний час не отримав внаслідок його великої трудомісткості. Першою роботою у

вітчизняному верстатобудуванні, що реалізовує розглянутий підхід стосовно автоматизованих розрахунків напружено-деформованого стану з'єднань корпусних деталей верстатів, є спільна робота В.С. Хом'якова і І.В. Тарасова [92]. Її докладніший опис приведений в першому розділі дисертації.

Великий практичний інтерес в плані розуміння суті процесів контактних деформацій представляють теоретичні результати, отримані Л.А. Галінім [9], К. Джонсоном [20], Т.Н. Шевельовою [105], а також результати моделювання контактних завдань методами фотомеханіки, отримані В.І. Атоповим, Ю.П. Сердобінцевим і О.К. Славнім [1].

Унікальні дослідження, в результаті яких була побудована універсальна математична модель контакту і зношування пар тертя ковзання, були проведені під керівництвом А.С. Пронікова в МГТУ ім. Н.Е. Баумана [62 - 64].

Розвиток засобів обчислювальної техніки і обчислювальної математики, зокрема машинних методів лінійної і нелінійної алгебри, привів до появи чисельних (ітераційних) методів вирішення контактних завдань. Першими роботами цього напрямку, орієнтованими на створення методів розрахунків верстатних з'єднань корпусних деталей, є публікації Р. Швенгера, С. Берчинські і В. Бедункевича [104], В.С. Хом'якова і І.В. Тарасова [92], а також Г.В. Маслова [50].

Можливість вирішення верстатних контактних завдань із залученням процедур оптимізації була продемонстрована в роботі Г.В. Маслова і А.М. Стерлина [51].

М.Г. Косовим [37] була запропонована концепція дискретної моделі точності верстатів на основі граничних і об'ємних кінцевих елементів. Ця концепція на відміну від вказаних вище враховує не тільки деформованість корпусних деталей несучих конструкцій верстатів, та стан мікро- і макрорельєфу контактуючих поверхонь їх з'єднань, але і наявність в останніх зазорів і натягу. Там же зроблено повідомлення про те, що на основі даної концепції розроблено відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення, що дозволяє вирішувати завдання точності верстатів в двомірній і тривимірній

постановках. На жаль, відсутність в конкретних прикладах розрахунків точності верстатів і результатів порівняння розрахункових і експериментальних даних не дозволяє оцінити повною мірою значущість цієї роботи.

Слід зазначити значною мірою оцінний характер розглянутих методів, оскільки практично неможливо врахувати всі чинники, що впливають на деформаційні властивості стиків.

З викладеного вище слідує вивід про те, що розробка комп'ютерних засобів аналізу конструкторських варіантів верстатів з позиції проектної оцінки їх точності з урахуванням вказаної вище специфіки верстатних контактних завдань в нелінійній постановці залишається актуальною, такою, що вимагає свого рішення завданням.

1.2.3. Вплив демпфування в стиках на динамічні характеристики верстата

Фундаментальні дослідження пружних систем, рухомих і нерухомих стиків і їх впливу на динамічні характеристики верстатів виконані Д.Н. Решетовим, В.В. Камінською, З.М. Левіною, В.С. Хом'яковим, Ф.С. Сабіровим, С.С. Кедровим, С.І. Досько, М. Yoshimura [107] і іншими ученими.

Демпфування в стиках елементів несучих систем верстатів визначає баланс розсіювання енергії у верстатах і їх вібраційні характеристики. По даним [19] величина відносного розсіювання енергії достатня стабільна і мало залежить від розмірів стику, частоти і амплітуди коливань.

При динамічних розрахунках несучих систем вони зазвичай розглядаються як низькочастотні коливальні системи в діапазоні частот до 80 - 100 Гц з відносно малим затуханням [19]. По даним [26, 29] логарифмічний декремент в стиках основних базових деталей не перевищує величини 0,3-0,5. Проте, поблизу резонансних частот передавальна функція коливальної системи може зростати на порядок

Мірою демпфуючої здатності стику введені коефіцієнти нормальної $\zeta_{\text{ст}}$ і тангенціальної $\eta_{\text{ст}}$ в'язкості (контактній в'язкості) стику, яка є питомим демпфуванням на одиницю площі [19]. На площі F стику затухання буде рівним:

при нормальних зсувах

$$h_{\sigma} = F \zeta_{\text{ст}}, \quad (1.1)$$

при тангенціальних зсувах

$$h_{\tau} = F \zeta_{\text{ст}}. \quad (1.2)$$

при повороті навколо осі симетрії стику затухання визначається по формулі

$$d_{\sigma} = J \zeta_{\text{ст}}, \quad (1.3)$$

де J – осьовий момент інерції стику.

Таке уявлення засноване на тому, що сила в'язкого тертя в лінійному випадку рівномірно розподілена по стику, який розглядається як сукупність нескінченного числа елементарних пружинок і демпферів.

Для визначення $\zeta_{\text{ст}}$ можна використовувати дані Д.Н. Решетова і З.М. Левіної [67]. Їх дослідження показали, що на коефіцієнт нормальної в'язкості сильно впливає кількість мастила. При кількості мастила $1,2 \text{ мг/см}^2$ коефіцієнт нормальної в'язкості в стику збільшується більш ніж в 7 разів в порівнянні з сухим (не змащеним) стиком (від 20 до $150 \text{ Н}\cdot\text{с/см}^2$).

Не виявлено істотної різниці між стиками сталевих і чавунних деталей, а також між шабреними і шліфованими стиками деталей. Для стику чавун-текстоліт коефіцієнт нормальної в'язкості приблизно в 2 рази більший від коефіцієнта нормальної в'язкості для стику чавун-чавун.

Числових значень коефіцієнтів тангенціальної в'язкості набуті в дослідженнях, які проводилися на верстаті [3] і на стенді [43]. Було встановлено, що при малому тиску в стиках тангенціальна в'язкість істотно залежить від величини цього тиску. Масла з поверхнево-активними добавками

дещо зменшують коефіцієнт тангенціальної в'язкості стику. У нерухомих стиках затухання при дотичних коливаннях залежить від амплітуди коливань, що зростають із її збільшенням. При повторних вантаженнях затухання менше, ніж при першому вантаженні.

Демпфуюча здатність стиків на один-два порядки вище демпфуючої здатності металів і співмірна з демпфуючою здатністю гуми, залізобетону і дерева.

При великому тиску поведінка стику при коливаннях таке ж, як матеріалу, з якого виготовлені контактуючі деталі. Оскільки демпфуюча здатність матеріалів нижче демпфуючої здатності стиків, то починаючи з деякого тиску, при його подальшому збільшенні демпфуюча здатність стиків зменшуватиметься.

При тангенціальних коливаннях стик може працювати як би в двох режимах. При першому режимі амплітуда тангенціальних коливань не перевищує величини попереднього зсуву. Попередній зсув є найбільшою величиною тангенціального зсуву в стику, після перевищення якого починаються незворотні деформації, тобто звичайне ковзання одного тіла по іншому. В цьому випадку тертя в основному буде в'язким. Якщо амплітуда коливань перевищує величину попереднього зсуву, то на демпфування починають робити вплив і сили тертя без мастила.

Демпфуванню тангенціальних коливань в стику при терті без мастила присвячена велика кількість робіт Я. Г. Пановко і його співробітників. Ним же запропонований термін конструкційне демпфування. Для стиків з прослизанням характерна наявність оптимального тиску, при якому демпфування має найбільшу величину. При великому тиску і меншому оптимального демпфування зменшується.

Випробування направляючих змішаного тертя на стенді [43] показало, що постійна часу спливання T столів (супортів) при зрушенні з місця складає величину 0,2-0,07 в діапазоні швидкостей 400–1400 мм/хв. Це час для

індустріальних мастил в діапазоні в'язкості від 14 сСт (індустріальне 12) до 44 сСт (індустріальне 45) змінюється мало.

При зменшенні швидкості ковзання постійна часу демпфування зростатиме до деякого значення. При певній малій швидкості число точок металевого контакту між стиками стане настільки великим, що направляючі поводитимуться як нерухомі стики.

1.3. Діагностика стану стиків НС верстата

Діагностика стану стиків є невід'ємною частиною випробувань верстата на надійність. Методика таких випробувань повинна ґрунтуватися на зв'язку вихідних параметрів верстатів з показниками, що характеризують працездатність окремих вузлів. Оскільки поступові відмови верстатів в більшості випадків пов'язані із зношенням поверхонь, що труться, то діагностика стану стиків (зношення, жорсткість, демпфування) є першочерговим завданням при випробуваннях на надійність. Це ж завдання безпосередньо пов'язане з прогнозуванням точнісної надійності верстата.

Для отримання достатньо вузьких інтервалів розподілу, що оцінюються в ході випробувань, параметрів надійності потрібно велике число повторних спостережень. Для надійного діагностування причин можливих відмов, пов'язаних із станом стиків, в більшості випадків потрібне розбирання вузлів і точне вимірювання. Обидва ці вимоги пов'язані із значними витратами часу і засобів.

Тому великого значення набувають методи форсованого випробування і безрозбірної діагностики верстатів. Завдання полягає в тому, щоб з мінімальними витратами заповнити інженерно-фізичними даними інформацію, якої недостатньо.

А.С. Пронніков виділяє шість напрямів форсованих випробувань на надійність [84], які можуть застосовуватися в сукупності: режимом, часом, точністю, функцією, моделюванням і використанням фізичних закономірностей відмов. Найбільший інтерес представляє форсування функцією і

моделюванням, оскільки ці методи можуть здійснюватися при мінімальних витратах на експериментальні роботи.

Форсування функцією фактично полягає в знаходженні на основі первинних експериментальних даних функціонального представлення зміни вірогідності безвідмовної роботи верстата $P(t)$, а у разі діагностики стику – імовірнісної функції зміни параметра, що діагностується $F(\mathbf{p}, t)$, де \mathbf{p} – у загальному випадку векторний параметр режиму навантаження стику (сила, момент, точка в робочому просторі верстата і тому подібне).

Форсування моделюванням тісно пов'язане з форсуванням функцією, оскільки отримані залежності $P(t)$ і $F(\mathbf{p}, t)$, є передумовами для побудови відповідних моделей.

1.4. Технологія віброакустичної діагностики верстатів

Вібраційна діагностика – метод діагностування технічних систем і устаткування, заснований на аналізі параметрів вібрації, або вібрації, створюється працюючим устаткуванням, або вторинною вібрацією, що обумовлена структурою досліджуваного об'єкту.

Методи і засоби оцінки технічного стану верстатів й іншого устаткування розвивалися поетапно. Спочатку використовувалися засоби контролю різних параметрів, потім моніторингу, і, на останньому етапі, системи діагностики і прогнозу технічного стану.

Впровадження кожного наступного виду систем дає користувачу нові можливості для переходу на обслуговування машин і устаткування по його фактичному технічному стану.

Так, контроль дозволяє отримати інформацію про величину параметрів і область їх допустимого відхилення. При моніторингу з'являється додаткова інформація про тенденції зміни параметрів у часі, що може використовуватися і для прогнозу. Ще більший об'єм інформації дає діагностування, як ідентифікація місця, виду і розміру дефекту.

Найбільш складною задачею є задача прогнозу розвитку дефекту, а не змін контрольованих параметрів, рішення якої дозволяє визначити залишковий ресурс або прогнозований інтервал безаварійної роботи.

В даний час під терміном моніторинг часто розуміють рішення всього комплексу процедур оцінки стану обладнання, але існуючі системи моніторингу, далеко не завжди вирішують питання ідентифікації дефектів і прогнозу їх розвитку в часі. Тому, під терміном моніторинг варто розуміти контроль основних параметрів, виявлення тенденцій їх зміни в часі і прогноз розвитку контрольованих параметрів, а під терміном діагностика – ідентифікацію дефектів і прогноз їх розвитку.

Сучасні системи моніторингу та діагностики машин і технологічного обладнання будуються на базі не руйнівних методів контролю і діагностування.

Використовувані в них методи діагностування можна розділити на дві основні групи.

До першої відносяться методи тестової діагностики, що вимагають формування штучних збурень, які подають на об'єкт діагностики. По ступеню спотворення введених збурень оцінюють стан об'єкта. Збурення мають відомі характеристики, і предметом вивчення є тільки ті відхилення, що виникають при їх вловлюванні як відгуків системи. Подібні методи будуються на базі досить простих інформаційних технологій і широко використовуються для діагностування вузлів та систем машин і устаткування на етапі їх виготовлення.

Друга група містить у собі методи функціональної діагностики, що використовуються, в першу чергу для машин, в яких є джерела природних збурень. Ці методи орієнтовані, насамперед, на аналіз процесів формування збурень, а не їх спотворення під час поширення. Більш того, спотворення, як правило ускладнюють аналіз вимірюваних сигналів і, як наслідок інформаційну технологію, що використовується.

Вимірювання коливань холостого ходу є основою для віброакустичної діагностики елементів несучої системи верстата, зокрема підшипників шпиндельного вузла [71].

Найпростішою з основних інформаційних технологій функціональної діагностики є енергетична технологія, заснована на вимірюванні потужності або амплітуди контрольованого сигналу. В якості діагностичного сигналу може використовуватися температура (перепад температур), тиск, шум, вібрація і багато інших фізичних параметрів. Технологія будується на вимірюванні розмірів сигналів у контрольних точках і порівнянні їх із граничними значеннями.

Розвитком енергетичної технології є інформаційна частотна технологія, що припускає виділення з вимірюваного сигналу складових у визначених частотних діапазонах і подальший енергетичний аналіз виділених складових. Технологія частотного аналізу використовується не тільки для контролю і діагностики машин, але і для їх аварійного захисту.

Ще одна, інформаційна фазо-часова технологія, заснована на порівнянні форми сигналів, які вимірюються через фіксовані інтервали часу. Ця технологія успішно використовується для контролю стану машин зворотно-поступальної дії з декількома однаковими вузлами (циліндрами і поршнями), що навантажуються послідовно через однакові інтервали часу.

Порівняння форми сигналів, але вже з еталонної, можна здійснювати за допомогою ще однієї, інформаційної спектральної технології, заснованої на вузькосмуговому спектральному аналізі сигналів. При використанні такого виду аналізу сигналів діагностична інформація міститься в співвідношенні амплітуд і початкових фаз основних складових і кожної з кратних їй по частоті складових. Така технологія застосовується для аналізу сигналів із датчиків тиску, вібрації, шуму, а також датчиків струму і напруги в електричних машинах і апаратах [33, 34].

Перераховані вище інформаційні технології застосовувалися ще в минулому сторіччі для контролю роботоздатності парових машин. Лише остання, спектральна технологія, почала широко використовуватись в середині ХХ століття після створення відносно простих аналізаторів спектру сигналів

різної природи. І в даний час ці технології широко застосовуються в системах контролю і керування машин і устаткування.

Всі вони, однак, мають загальний недолік при використанні в задачах діагностики, коли потрібно виявити дефекти різних вузлів, що зароджуються. Він пов'язаний із тим, що діапазон величин вимірюваних параметрів навіть у групі однакових бездефектних машин, як правило, перевищує зміни, характерні для появи дефектів, що зароджуються.

Результати статистичних досліджень показують, що типовий розкид розмірів багатьох складових лежить у межах 20 дБ, тобто 10 разів, а для деяких складових виявляється ще вище. У той же час дефекти в початковій стадії розвитку можуть чинити значно менший вплив, змінюючи характерні для цих дефектів розміри параметрів вібрації усього в 2-3 рази.

Іншою найважливішою характеристикою систем діагностики є необхідний ступінь підготовки оператора. По об'єму необхідної від оператора діагностичної підготовки, системи можуть бути розділені на три групи.

Перша група – професійні системи діагностики, у яких оператор самостійно вибирає інформаційну технологію і засоби вимірювання. Знання і досвід оператора-експерта при використанні подібної системи цілком визначають глибину і достовірність діагнозу і прогнозу.

Друга група – експертні системи діагностики, що включають у себе експертні програми, що містять відповіді на типові запити оператора, тобто такі, що допомагають оператору приймати рішення у визначених ситуаціях. Експертні системи можуть застосовуватися операторами, що мають спеціальну підготовку, але не володіють досвідом експертів.

Третя група – системи автоматичного діагностування. Вони будуються по методах, що дозволяє автоматизувати постановку діагнозу, формуючи для оператора програму вимірів, і не вимагають від користувача спеціальної підготовки.

1.5. Моніторинг і діагностика вібрацій верстатів

Розвиток засобів вимірювання і обчислювальної техніки в останні роки дозволив частково вирішити проблеми контролю і діагностики шляхом створення систем моніторингу машин і устаткування на базі розглянутих інформаційних технологій. Такі системи, орієнтовані на перманентний контроль діагностичних параметрів конкретної машини або устаткування, які мають спеціальні режими адаптації на початковому етапі експлуатації, коли дефекти частіше усього відсутні. На цьому ж етапі виявляються і враховуються особливості впливу режимів роботи машини і зміни зовнішніх умов, таких як температура, якість електричного живлення і т. п., на діагностичні параметри. Це знижує ймовірність помилкового спрацьовування системи моніторингу при зміні режимів або зовнішніх умов.

Протягом багатьох років методи контролю і діагностування машин та устаткування по будь-яких видах діагностичних сигналів ґрунтувалися на порівнянні розміру сигналу або його складових із граничними значеннями, що розділяють множини бездефектних і дефектних станів. Системи контролю і діагностики, створювані на базі цих методів, забезпечували виділення інформативних складових із вимірюваного сигналу і реєстрацію моментів перевищення ними граничних значень. Будь-яке перевищення граничних значень реєструвався як дефект, вид якого визначався по сукупності складових, що перевищили задані для кожного із них допустимих границь. Сучасні системи моніторингу стану обладнання, що є логічним розвитком систем контролю, і зараз будуються за цими принципами. Однак деякі системи моніторингу дозволяють уже не тільки контролювати розміри параметрів, порівнюючи їх із граничними значеннями, виявляти тенденції їхньої зміни в часі, але і прогнозувати час, коли вони досягнуть граничних значень.

Проблеми користувача систем моніторингу пов'язані з необхідністю інтерпретувати виявлені та прогнозовані зміни стану об'єкта дослідження. Природною межею, що розділяє системи моніторингу і діагностики, міг би

бути етап розподілу виявлених змін на дві групи, зворотні (зміна умов роботи машини) і незворотні (дефекти).

На жаль, жодна із систем моніторингу не вирішує цілком задачу такого розподілу. Тому системи діагностики повинні вступати в дію до того, як виявлені системою моніторингу зміни будуть розділені на групи зворотних і незворотних.

У зв'язку з цим, однієї з основних характеристик систем діагностики варто вважати глибину її інтеграції в систему моніторингу.

При безрозбірній вібродіагностиці вирішується не тільки, які деталі втратили працездатність, але ідентифікується, які фактори і якою мірою визначають цю втрату. В техніці ремонт на практиці здійснюється трьома основними способами [5]:

- 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 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 інтерфейс для користування 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 [15, 16]. 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.

У вібродіагностиці 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.

Ефективним експериментальним методом визначення динамічних характеристик НС верстата є аналіз мод коливань [53, 54, 91] на основі

результатів вимірювань і аналізу вимушених механічних коливань. Існує два методи модального аналізу: традиційний і операційний.

У традиційному модальному аналізі створюється контрольоване вхідне збудження і проводиться аналіз між вихідним відгуком і вхідним збудженням. Джерелом вхідного збудження є ударний молоток з вбудованим датчиком сили або електродинамічний збудник з вбудованим датчиком сили. У реальних умовах експлуатації для складних конструкцій з багатомодовими коливаннями, часто немає можливість провести традиційний модальний аналіз.

Операційний модальний аналіз дозволяє провести модальний аналіз, використовуючи тільки вихідний відгук конструкції при нормальних експлуатаційних режимах. Визначення модальних параметрів в робочому режимі володіє величезною користю, оскільки отримана модальна модель показує фактичні сили і рівні вібрації за дійсних граничних умов. Це також дозволяє проводити випробування механічної системи, коли її важко порушити штучно і коли неможливо безпосередньо зміряти вхідні сили.

Спеціальна програма дозволяє отримувати з сигналів акселерометрів, які віддають сигнал пропорційний прискоренню, сигнали віброшвидкості і віброзміщення.

Після перетворення сигналу вібрації (шуму) в електричний сигнал, останній необхідно ретельно аналізувати, 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).

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. 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.

Поширена на сьогодні технологія вібродіагностики верстатів складається з наступних етапів [73]:

1. Фахівець вивчає креслення верстата і визначає крапки, в які встановлюватиметься акселерометр. Операція складна, але проводиться тільки 1 раз для кожного верстата - навіть верстата одного типу часто відрізняються по конструкції, не говорячи вже про відмінності між фрезерним і наприклад, токарним верстатом.

2. У повністю робочому верстаті фахівець по черзі встановлює акселерометр, знімаючи еталонні показники вібрації в різних місцях конструкції – підготовка завершена.

3. Після встановленого терміну експлуатації верстата фахівець знову встановлює акселерометр в потрібних вузлах і знімає дані. По змінах люфтів (вібрації) в різних місцях верстата фахівець визначає зношення, або дрібні поломки в механіці верстата.

Частоти, які обумовлені невірноваженістю валу, виявляються на частоті обертання валу і на кратних частотах, що говорить про дефекти зборки і виготовлення. Подвійна частота обкатки тіл кочення по зовнішньому кільцю показує перекіс зовнішнього кільця підшипника. Автоколивання, що виникають

на половині частоти обертання валу, можуть бути пов'язані з автоколиваннями в підшипнику ковзання. Детально можливості методики розглянуті в роботах [73, 74].

Час для проведення вимірювань одного верстата в цеху складає 2-3 години. Заздалегідь формується керуюча програма на певну модель верстата. При виконанні вимірювань за керуючою програмою необхідно зняти заздалегідь певні вібраційні характеристики в намічених точках шляхом почергового переустановлення одного акселерометра.

Далі фактично відбувається порівняння експериментальних даних і розрахункових показників, що характеризують роботу нових і бездефектних вузлів і ті, що комплектують.

Замість повного розбирання верстата потрібне лише часткове розбирання тих вузлів, де є дефектні деталі і усунення конкретних несправностей. Тобто реально необхідний об'єм роботи складає не більше 40% в порівнянні з витратним методом згідно ППР.

Дослідження в області вібродіагностики і модального аналізу несучих систем верстатів активно розвивають такі вчені як: Хом'яків В.С., Досько С.І., Сабиров Ф.С., Макаров В.М. (МГТУ «СТАНКИН»); Ю.И.Савинов, В.Б.Носиков (ФГУП «НПО «Техномаш»), В.И.Писарев («ЦСКБ-ПРОГРЕСС»); И.В.Голубев (ОАО «Станкозавод им. Орджоникидзе») і ін.

1.6. Обґрунтування вибраного напрямку роботи і постановка задач дослідження

Аналіз існуючих робіт показав наступне:

1. Такі важливі характеристики верстатів як точність і вібростійкість істотно залежать від стану рухомих і нерухомих стиків між деталями несучої системи верстата. Непостійність точності і вібростійкості в просторі обробки вимушує занижувати режими обробки, тобто знижує ефективність верстатів. Тому велике значення має своєчасне і оперативне діагностування зношення поверхонь стиків, зміни їх жорсткості і демпфуючої здатності.

2. Параметри і характеристики стиків змінюються в часі і схильні до великої кількості випадкових чинників – технологічних і експлуатаційних.

3. Прогнозування величин зношення поверхонь рухомих стиків, засноване на існуючих аналітичних і емпіричних залежностях не забезпечує достатню точність

4. У свою чергу мало передбачені явища зношення в рухомих стиках супроводжуються зміною їх інженерно-фізичних характеристик так само з великою часткою невизначеності.

5. Характеристики, пов'язані з продуктивністю і точністю, змінюються у міру фізичного зношення верстата або розрегулювання його елементів. Використовувати цей величезний резерв підвищення продуктивності намагаються багато дослідників, створюючи системи адаптивної обробки, системи діагностики і моніторингу. Для вирішення цих завдань потрібні мобільні технічні засоби і комплекс розрахункових і експериментальних методик, що дозволяють оперативно оцінювати характеристики верстатів у всьому ТРП з врахуванням різноманіття вживаних заготовок і видів інструменту, і оцінювати, таким чином, можливості верстата по продуктивності і точності.

6. Вимоги підвищення ефективності верстатного парку підвищує значущість діагностування стану стиків таким маловитратним методом форсованих випробувань верстатів на надійність, як випробування на основі моделювання.

Враховуючи сказане, представляється актуальним завданням створення методик діагностування верстатів, яка дозволяла б отримувати залежності характеристик елементів несучої системи верстатів і стиків від чинників, що впливають на них: координат робочого простору і параметрів вантаження. Такі залежності повинні бути зручні для використання при оцінці стану верстатів, а їх отримання повинне забезпечуватися при мінімальних матеріальних і часових витратах.

Метою роботи є розробка ефективних методів діагностування стану несучої системи металорізального верстату, зокрема нерухомих і рухомих стиків з врахуванням процесів зношування і прироблення.

Методики, що розробляються, базуються на гіпотезі про подібність і коінтегрованість розвитку процесів зміни деформаційних властивостей стиків, а також методах частотного аналізу, методів розпізнавання.

На підставі викладеного в дисертаційній роботі ставляться наступні завдання:

1. теоретично і експериментально обґрунтувати припущення про подібність розвитку процесів зміни і коінтегрованість деформаційних властивостей стиків токарних верстатів;
2. розробити методику і програмно-математичне забезпечення для експериментально-розрахункової оцінки і діагностики деформаційних властивостей стиків;
3. розробити методику моделювання діагностики динамічних властивостей елементів несучої системи верстату на основі розрахунково-експериментального модального аналізу;
4. побудувати матричні моделі вібраційної діагностики елементів несучої системи верстату з використання методів на основі імовірнісних ланцюгів Байєса;
5. розробити моделі Фур'є-аналізу кривої биття шпиндельного вузла токарного верстату і встановити зв'язки між джерелами похибок і діагностичними ознаками;
6. провести експериментальні дослідження, щодо перевірки основних положень теоретичних розробок.

РОЗДІЛ 2

ПОДІБНІСТЬ І КОІНТЕГРОВАНІСТЬ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ДЕФОРМОВАНОСТІ СТИКІВ

2.1. Подібність процесів розвитку деформованості стиків

Як показали дослідження [61, 63], навіть напрямні однотипних верстатів, випущених одним і тим же заводом, можуть мати істотний розкид характеристик контактної жорсткості і демпфування. При експлуатації верстата поверхні рухомих стиків схильні до дії безлічі випадкових чинників, які приводять до їх зношення і випадкової зміни в часі фізико-механічних характеристик стиків. У меншій мірі це можна віднести також і до нерухомих стиків, оскільки в результаті часової релаксації, вібрацій верстата і т.п. умови сполучення поверхонь змінюються.

У даній роботі перевіряється і обґрунтовується припущення про те, що розвиток в часі кривих контактної деформації розвиваються в часі подібно. Це відноситься як до періоду прироблення поверхонь, так і до періоду лінійного зношення.

Обґрунтування і доказ правильності такого припущення дозволить істотно скоротити матеріальні і часові витрати на діагностику стиків і підвищити достовірність прогнозування точнісної надійності верстатів.

Встановлення числових значень таких характеристик стиків, як пляма контакту, контактна жорстокість, величина зношення і ін., так або інакше, пов'язані з процесами випробувань верстатів, або використанням відомих аналітичних методів розрахунку, або їх комбінації. При цьому результатом таких досліджень є функція $F(p, q, t)$ від часу t , деякого незалежного параметра p і фіксованого параметра q , які в загальному випадку є векторними, функція F – деяка поверхня. При цьому частина параметрів може змінюватися в ході експерименту (незалежні параметри p - чинники), а інша частина фіксуватися

на деяких рівнях (фіксовані параметри q). Наприклад, при вивченні зношення направляючих параметр p буде координатами її поверхні; при визначенні кривої «навантаження – деформація» вектор p включатиме величини навантажень і координати їх прикладання. Фіксований параметр q в ході випробувань буде незмінними параметрами такими як: температура навколишнього середовища, параметри робочого простору верстата, параметри технологічного процесу і тому подібне. Надалі розглядається функція $F(p, t)$ або просто F з врахуванням параметра q , як умови випробувань.

Введемо позначення F_e – еталонна поверхня (фігура). За еталонну поверхню може бути прийнята, наприклад, зміряна, або розрахована при $t = t_0$ крива «навантаження – деформація» в стику; фігура F – те ж при $t = t_1$

У математичному аналізі подібність фігур визначається співвідношенням еквівалентності [47]. Фігура F називається подібній фігурі F_e , якщо існує перетворення подібності, при якій $F_e \rightarrow F$. Тоді згідно визначенню, співвідношенням еквівалентності для статичних процесів $F(p)$ і $F_e(p)$ буде вираз

$$F(p) \sim F_e(p) R(p), \quad (2.1)$$

де $R(p)$ функція параметра p , або масштабуюча функція, що визначає міру еквівалентності (подібності) $F(p)$ і $F_e(p)$; « \sim » – знак співвідношення еквівалентності.

Якщо $F(p, q_e, t_0)$ і $F_e(p, q_e, t_1)$ – один і той же процес в різні моменти часу t_0 і t_1 при однаковому фіксованому параметрі q_e , то доречно говорити про подібність. Зручно для пониження розмірності задачі представляти масштабуючу функцію $R(p)$ поліномом $R^n(p)$ ступеня n .

Коефіцієнти c_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) полінома $R^n(p)$ визначаються МНК процедурою в програмі DefStyk (Додаток А). При цьому мінімізується сума квадратів відхилень полінома регресії $F_e(p) \cdot R(p)$ від $F(p)$ в (2.1).

На рис 2.1 представлені за даними роботи [69] криві «навантаження – деформація» в плоскому стику для деталей із сталі 40X, оброблених з різною шорсткістю поверхонь залежно від подачі S інструменту.

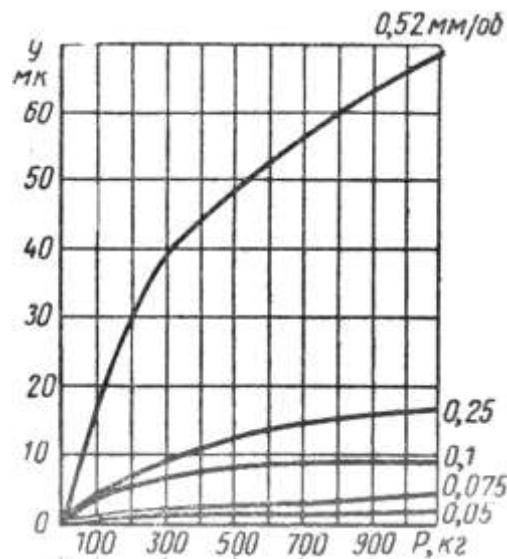


Рис 2.1. Криві «навантаження – деформація» в плоскому стику для деталей із сталі 45 [69]: ПЕ1 $S=0,1$ мм/об – еталон; ПЕ2 $S=0,075$ мм/об; ПЕ3 $S=0,05$ мм/об; ПЕ4 $S=0,25$ мм/об; ПЕ5 $S=0,520$ мм/об; (ПЕ – пружний елемент)

За еталон прийнята крива ПЕ1 $S=0,1$ мм/об, параметр p – скалярний, приймає значення з ряду 0, 100, 200, ..., 1100 Н. В табл. 2.1 приведені значення коефіцієнтів з поліномів $R^3(p)$ 3-го порядку і середньоквадратичні значення відхилень σ від зміряних кривих для ПЕ i .

З табл. 2.1 видно, що процес ПЕ1 подібно розвивається до процесів ПЕ i при зміні шорсткостей в середньому з середньоквадратичними відхиленнями σ . Цей параметр може служити мірою подібності. Прийнятною похибкою подібності можна вважати криві, найближчі до еталонної для $S = 0,075$ ($\sigma=0,02$) та $S = 0,250$ ($\sigma=0,002$) мм/об. На рис. 2.2 приведені графіки, розраховані для цих умов за програмою моделювання деформацій стиків DefStyk (див. Додаток А).

Таким чином, подібність процесів необхідно розглядати в середньому, а його межі визначаються допустимою середньою похибкою σ . Для розглянутого прикладу при максимальній похибці $\sigma_{max}=0,05$ мкм процес розвитку деформації стику можна вважати самоподібним від процесу ПЕ1 ($S = 0,100$ мм/об) для

шорсткостей, що визначаються діапазоном подач при обробленні $\Delta_S = 0,045 \dots 0,66$ мм/об (рис. 2.3).

таблиця 2.1

Коефіцієнти поліномів $R^3(p)$ для ПЕі від еталону ПЕ1

ПЕ	S , мм/об	c_0	c_1	c_2	c_3	σ , мкм	var
ПЕ1	0,1	1	0	0	0	0	0
ПЕ2	0,05	1,378	-0,657	0,104	-0,005	0,048	0,02945
ПЕ3	0,075	1,3	-0,505	0,077	-0,003	0,02	0,00673
ПЕ4	0,25	0,875	0,206	-0,021	0,001	0,002	0,00016
ПЕ5	0,52	-1,365	3,572	-0,538	0,026	1,226	0,02529

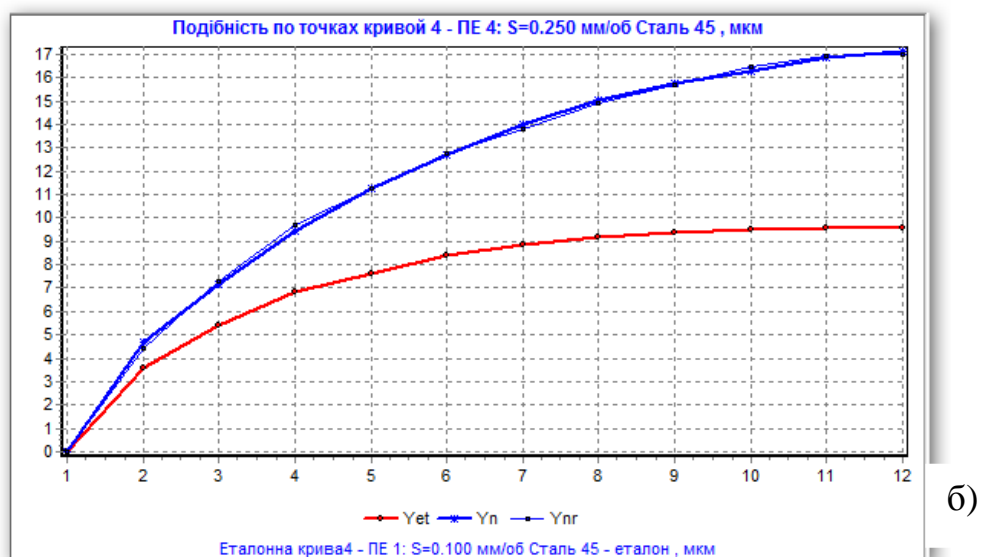
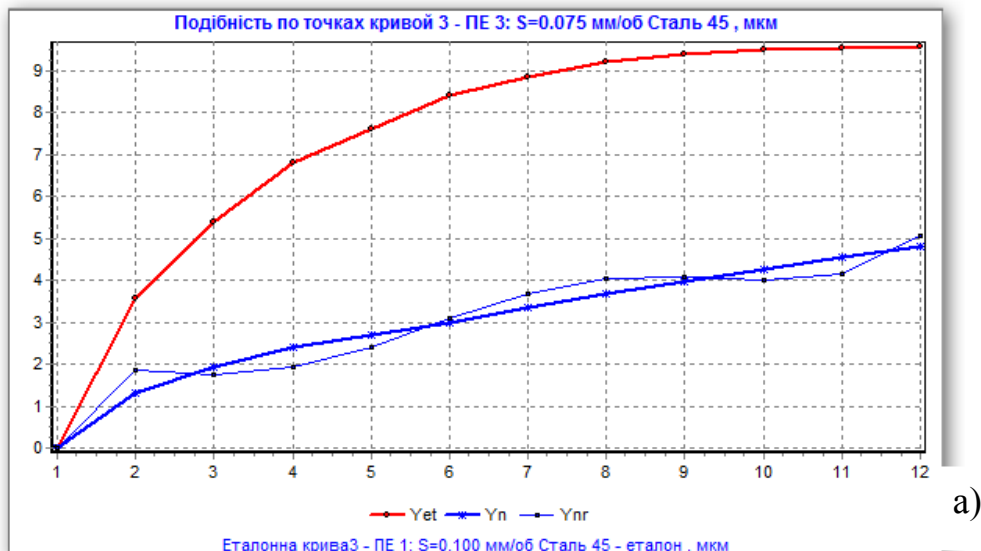


Рис. 2.2. Графіки подібності від еталону ПЕ1 із сталі 45 ($S = 0,100$ мм/об) для: а) $S = 0,075$ ($\sigma=0,02$); б) $S = 0,250$ ($\sigma=0,002$) мм/об

Більш універсальною характеристикою є варіація var_σ (рис. 2.4), що визначається як відношення u до значення зсуву u в середній частині кривої при $P= 600 \text{ Н}$ (рис 2.1). Тут при 2%-ій точності ($\text{var}_\sigma=0,02$) процес розвитку деформації стику можна вважати самоподібним від процесу ПЕ1 ($S = 0,100 \text{ мм/об}$) для шорсткостей, що визначаються діапазоном подач при обробленні $\Delta_S = 0,06 \dots 0,46 \text{ мм/об}$ (рис. 2.4).

Подібність процесів розвитку деформацій в стиках може служити основою для ідентифікації характеристик стиків при їх діагностиці.

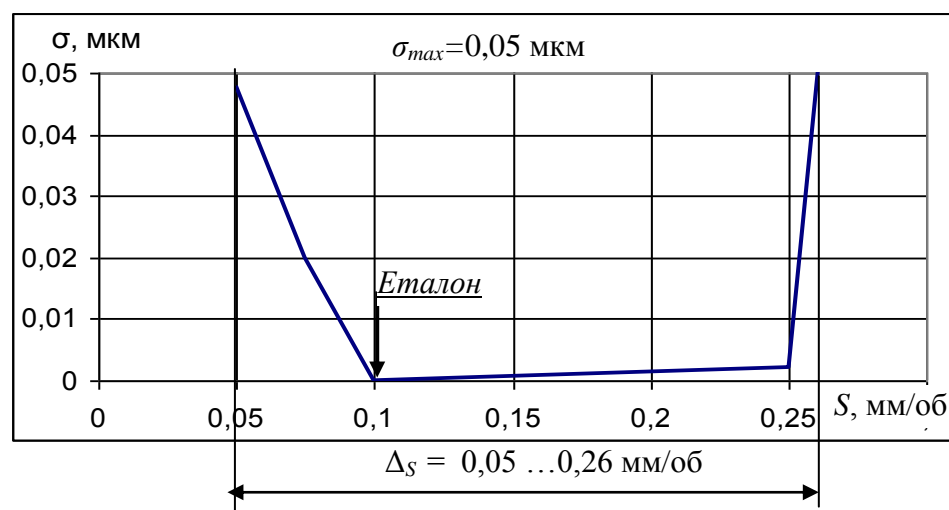


Рис. 2.3. Графік середньоквадратичних відхилень σ подібності процесу розвитку деформацій в стиках сталі 45 (табл. 2.1) від величин подач S при обробленні

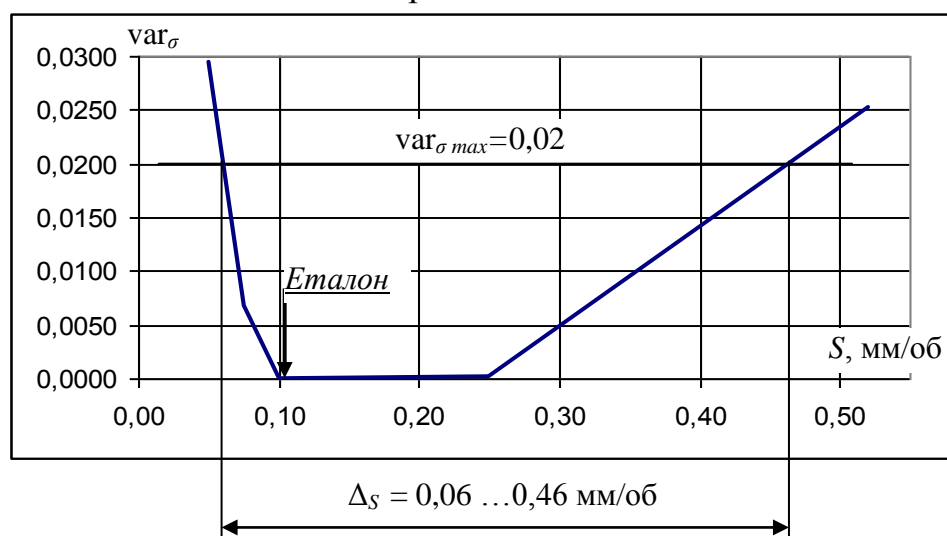


Рис. 2.4. Графік варіацій var_σ подібності процесу розвитку деформацій в стиках сталі 45 (табл. 2.1) від величин подач S при обробленні

2.2. Коінтегрованість процесів розвитку деформованості стиків

У практиці дослідження випадкових процесів широко використовується поняття коінтеграції рядів динаміки (РД), сутність якої полягає у тому, що два РД $f(t)$ і $F(t)$ коінтегровані (зв'язані), якщо обидва ряди мають однаковий порядок π інтеграції $I(\pi)$ [81], де π – порядок взяття перших різниць від базового ряду, після якого ряд має порядок $I(0)$. При цьому якщо обидва РД $f(t)$ і $F(t)$ мають однаковий порядок інтеграції, то вони коінтегровані, а $F(t)$ можна виразити лінійною комбінацією ряду $f(t)$ або лінійною регресією

$$F(t) = a + b \cdot f(t) + \varepsilon(t), \quad (2.2)$$

де $\varepsilon(t)$ – стаціонарний процес, або похибка; t – параметр часу.

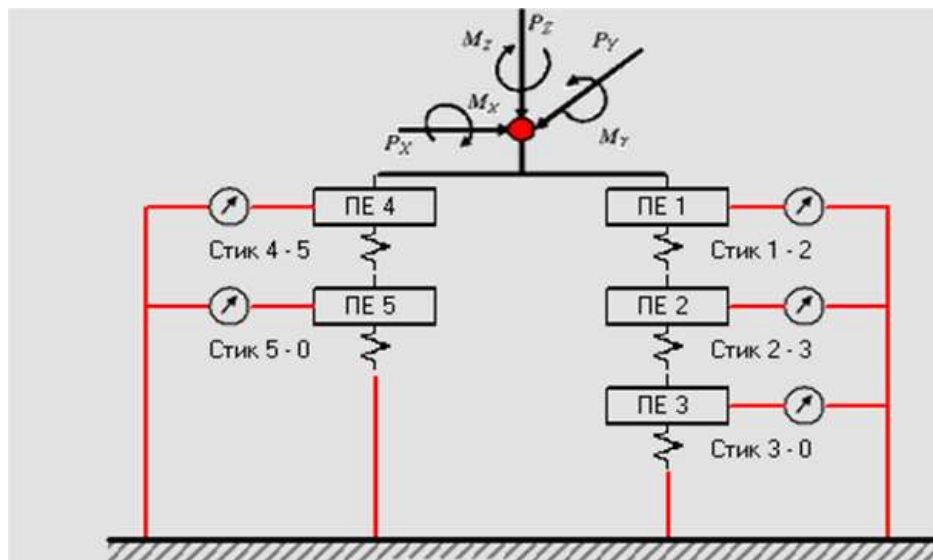
Параметр t може бути будь-яким параметром навантаження p , наприклад, p – дискретний ряд навантажень, який імітує силу різання. В нашому випадку сигнал $f(p)$ може бути дискретним рядом деформацій пружної системи (ПС) верстату в зоні різання, а $F(p)$ – дискретним рядом відповідних деформацій стику.

Коінтеграція двох РД значно спрощує процедури і методи їх аналізу, оскільки у цьому випадку можна будувати рівняння регресії і визначати показники кореляції, використовуючи в якості початкових даних безпосередньо рівні досліджуваних рядів, враховуючи тим самим в повному об'ємі інформацію, яка міститься у початкових даних.

Існує ще один важливий аспект цієї задачі, який більш характерний в основному для технічних систем. У технічних системах динамічну зв'язність двох РД практично не треба доводити, вона витікає з сутності процесів. Наприклад, деформація стику явно залежить від інтенсивності його навантаження, похибки оброблення заготовки визначаються змінним припуском на її поверхні і т.д. У цьому випадку з'являється можливість прогнозування послідовності ряду $F(p)$ по вимірюваному $f(p)$, якщо коінтегрованість цих двох РД доведена.

На рис. 2.5 надано структурну схему елементів технологічної пружної системи (ТПС) токарно-револьверного верстата мод. 1Б118. Обґрунтуємо припущення про однозначність зв'язку деформацій.

При дослідженнях використовувалися умови й результати експериментів, які наведені в роботі [84]. Зіставлялися два процеси (рис. 2.6): $f(p)$ – деформації ТПС верстату в зоні різання (індикатор 1-2 в напрямку P_Y) і $F(p)$ – деформації стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» (індикатор 3-0 в напрямку L_Y). Параметри стику довільно змінювалися шляхом зміни зусилля затягування притискної планки направляючих каретки. Виміри виконувалися від бази горизонтальних направляючих станини.



БАЗА

- PE 0: Горизонтальні напрямні станини (база)
- PE 1: Револьверна головка (по фіксатору посадкових шийок)
- PE 2: Фіксатор – корпус супорта (по отворі в корпусі)
- PE 3: Револьверний супорт (по напрямним каретки)
- PE 4: Шпиндель (по опорах в шпиндельній бабці)
- PE 5: Бабка шпинделя (по горизонтальній станині)

Рис. 2.5. Структурна схема елементів ТПС токарно-револьверного верстата

При дослідженнях використовувалися умови й результати експериментів, які наведені в роботі [84]. Зіставлялися два процеси (рис. 2.6): $f(p)$ – деформації ТПС верстату в зоні різання (індикатор 1-2 в напрямку P_Y) і $F(p)$ – деформації стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі

станини» (індикатор 3-0 в напрямку L_Y). Параметри стику довільно змінювалися шляхом зміни зусилля затягування притискної планки направляючих каретки. Виміри виконувалися від бази горизонтальних направляючих станини.

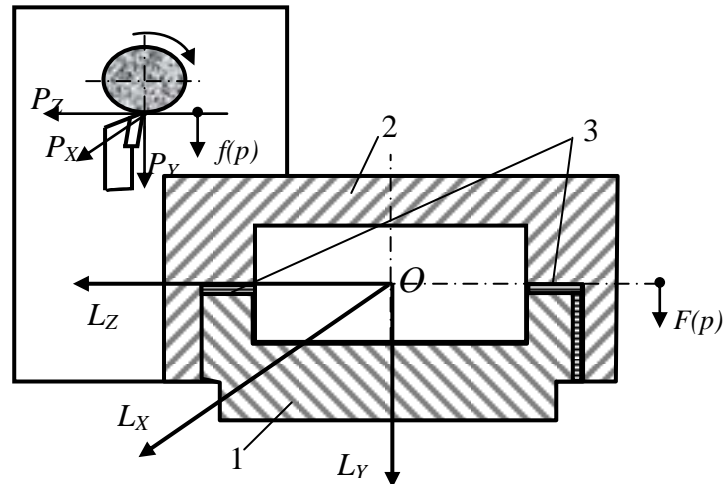


Рис. 2.6. Схема стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини»: 1 – станина верстату; 2 – каретка револьверного супорту; 3 – стик

Таблиця 2.2

Результати виміру деформацій від параметру навантаження, мкм

P, H	$u1(p)$	$u2(p)$	$u3(p)$	$u4(p)$	$f1(p)$	$f2(p)$	$f3(p)$	$f4(p)$
70	2,9	2,9	2,6	4,0	0,1	0,1	0,1	0,2
170	7,5	8,5	6,3	9,6	2,8	2,8	2,5	3,5
270	15,3	16,6	13,7	19,6	5,6	6,3	5,3	7,2
370	20,5	22,4	18,3	26,2	8,1	8,9	7,2	10,5
470	25,3	27,7	22,8	32,8	10,3	11,3	9,3	13,7
570	30,0	32,9	27,2	38,9	12,2	13,6	11,0	15,8
670	34,9	38,3	31,8	45,5	13,8	15,2	12,4	17,8
770	40,0	43,9	36,4	51,7	14,9	16,4	13,3	19,2
870	43,6	48,1	39,6	56,7	15,6	17,0	14,3	20,3

У табл. 2.2 наведені дані трьох вимірів із серії навчання і контрольний вимір для перевірки прийнятого припущення.

Для автоматизації застосування означеної методики була розроблена програма ConRow [99] в середовищі Borland Delphi-7, інтерфейс якої на

розкритій вкладці «Часові ряди» представлений на рис. 2.7. Форма має ще 2 вкладки: «Прогноз» і «Протокол». Нижня панель форми (поз. 16) має кнопки відкриття інформаційних файлів: «Правила формування задачі», «Основні поняття» і «Метод оцінювання $\Phi(t)$ », які дозволяють користувачеві адаптуватися до роботи з програмою.

Режим введення даних (поз. 1) передбачає дві можливості: генерацію траєкторій рядів даних (див. поз. 4 і 5) і читанням даних з файлу (див. поз. 6). В режимі «Генерації траєкторій» довжина рядів даних задається користувачем у вікні поз. 2.

У таблицях і на графіках прийняті такі позначення: $f(t)$ і $u(t)$ – вхідні сигнали відповідно навчаючі та для прогнозу; $F(t)$ і $\Phi(t)$ – вихідні сигнали (відгуки) відповідно при навчанні і прогнозований; $h(t)$ – дискретна вагова функція.

У програмі закладена можливість стабілізації значень $f(t)$ і $u(t)$ на рівні f_{\max} і u_{\max} (вікно «Max f(t):», поз. 4).

Статистика за результатами аналізу рядів відображається у таблиці (поз. 7). Тут задається рівень значущості статистик у % (за замовчуванням – 5%), а також можна перейти до односторонніх критеріїв. Виводяться наступні статистики:

- 1) коефіцієнт кореляції в парах рядів R_{uf} ;
- 2) коефіцієнт детермінації в парах рядів R^2 ;
- 3) автокореляція для залишків, модель AR(1) [81];
- 4) автокореляція для залишків, модель AR(2);
- 5) підтвердження (або ні) гіпотези про коінтеграцію пари рядів за статистикою Енгла – Гренджера [81];
- 6) підтвердження (або ні) гіпотези про коінтеграцію пари рядів за статистикою Дарбіна – Уотсона [81].

Введені, або генеровані дані відображаються в двох відповідних таблицях (поз. 9): «Траєкторії впливів ...» $f(t)$ і «Траєкторії відгуків ...» $F(t)$. Останні рядки цих таблиць містять дані для прогнозованого рядка, який оцінюється. В

третьої таблиці (поз. 11) відображаються результати передбачення (прогнозу). Таблиця має 4 рядки, в яких задаються для кожної точки залежного ряду $F(t)$ наступні дані:

- 1) $F(t)$ – введені дані, якщо вони відомі;
- 2) $\Phi(t)$ – прогнозовані дані за методом багатовимірної лінійної екстраполяції (БВЛЕ);
- 3) величина похибки по точках $\Delta(t)$ – ваги $= 100 \cdot [\Phi(t) - F(t)] / \Phi(t)$, %;
- 4) $h(t)$ – ваги по точках, які зв'язують вплив $u(t)$ з прогнозом $\Phi(t)$ за формулою

$$\Phi(t) = u(t) \cdot h(t). \quad (2.3)$$

Прогнозовані за методом багатовимірної лінійної екстраполяції (БВЛЕ) ряди $\Phi(t)$, $\Delta(t)$ і $h(t)$ – ваги виводяться в таблицю клацанням по кнопці «Оцінка $\Phi(t)$ » (поз. 13).

Графічне відображення даних (поз. 12) призначене для візуалізації аналізу. Тут відображаються по точках графіки: $f(t)$, $u(t)$; $F(t)$; $\Phi(t)$; $h(t)$. Додатково показані криві згладжування $\Phi[u(t)]$ і $h[u(t)]$, які обчислюються як поліноміальні регресії Φ і h від регресору $u(t)$. Найкраще наближення $\Phi[u(t)]$ і $h[u(t)]$ контролюється візуально по відповідних графіках, а також мінімізацією їх середньоквадратичних похибок S_f і S_h .

Для врахування (і визначення) впливу попередніх станів ряду $u(t)$ на значення веденого ряду $\Phi(t)$ необхідно знати модель такого впливу. Ця модель будується за аналогією з моделями авторегресії для одного ряду $AR(p)$ [81], де p – порядок (лаг) моделі. Моделі $CR(p)$ для $\Phi[u(t)]$ і $h[u(t)]$ будуються за формулами:

$$\begin{aligned} CR(p)_{\Phi[u(t)]} : \Phi_t &= a_0 + a_1 u_{t-1} + a_2 u_{t-2} + \dots + a_p u_{t-p} + \varepsilon_{\Phi t}; \\ CR(p)_{h[u(t)]} : h_t &= b_0 + b_1 u_{t-1} + b_2 u_{t-2} + \dots + b_p u_{t-p} + \varepsilon_{ht}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

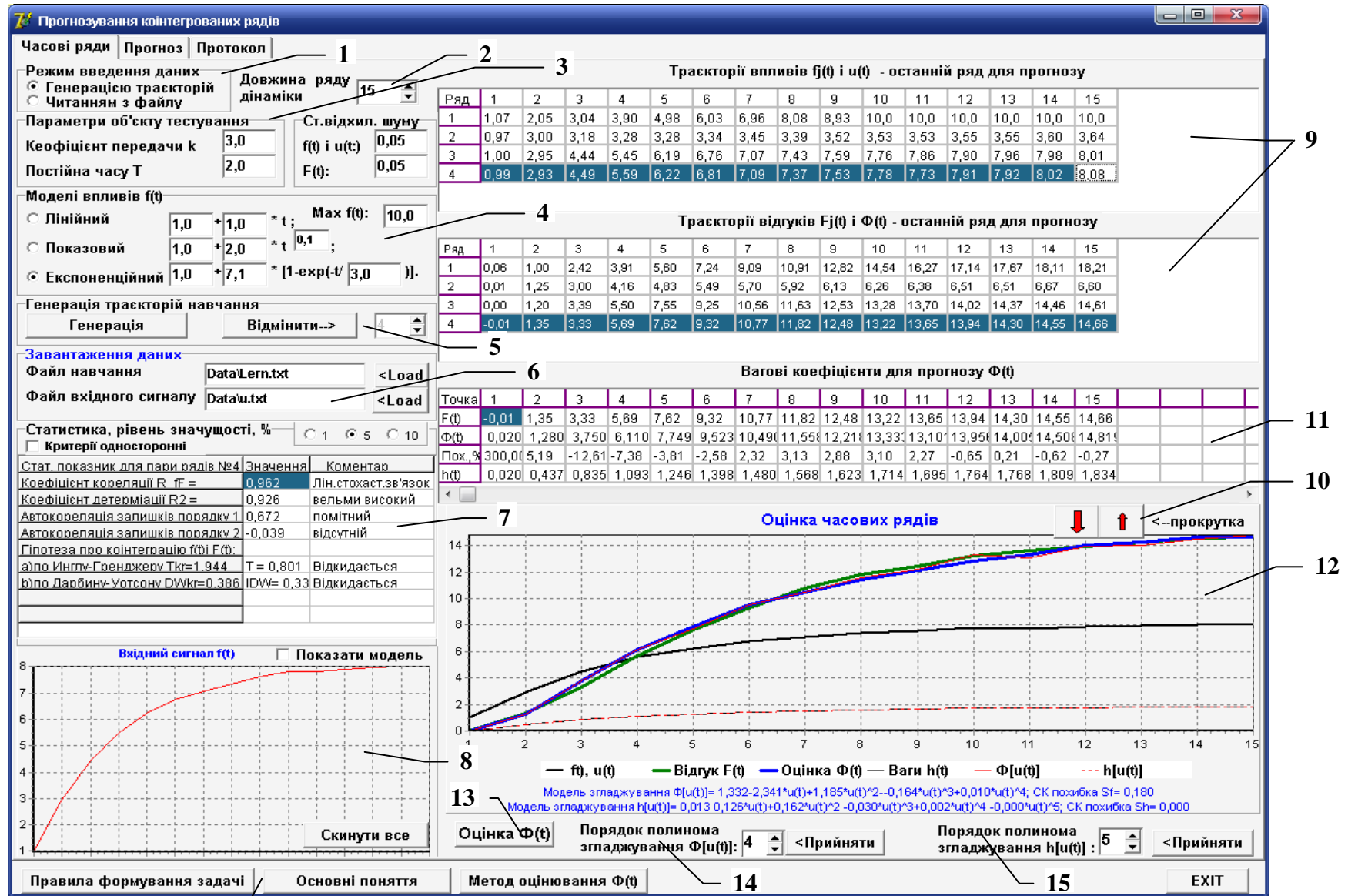
де $\varepsilon_{\Phi t}$ і ε_{ht} – процеси, які пов'язані із залишками.

Ці моделі візуально і у вигляді формул регресій відображаються на графіках (поз. 4). При цьому визначається середнє залишків і перевіряється за статистикою знаків їх випадковість. За отриманими моделями визначаються також й прогностні значення $\Phi[u(t)]$ і $h[u(t)]$.

Встановлення порядку моделей $CR(p)$ коінтеграційної регресії здійснюється окремими елементами управління (поз. 5 і 6).

У таблиці над графіками показано точне («Точн») розрахункове значення відгуку $F(t)$, його прогнозоване значення (« $\Phi(t)$ »), а також відсоток помилки для кожної точки ряду за формулою:

$$\delta = \frac{F(t) - \hat{O}(t)}{F(t)} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$



16

Рис. 2.7. Інтерфейс (головна форма) програми ConRow

На рис. 2.8 наведені результати розрахунку прогнозних значень $\Phi(t)$.

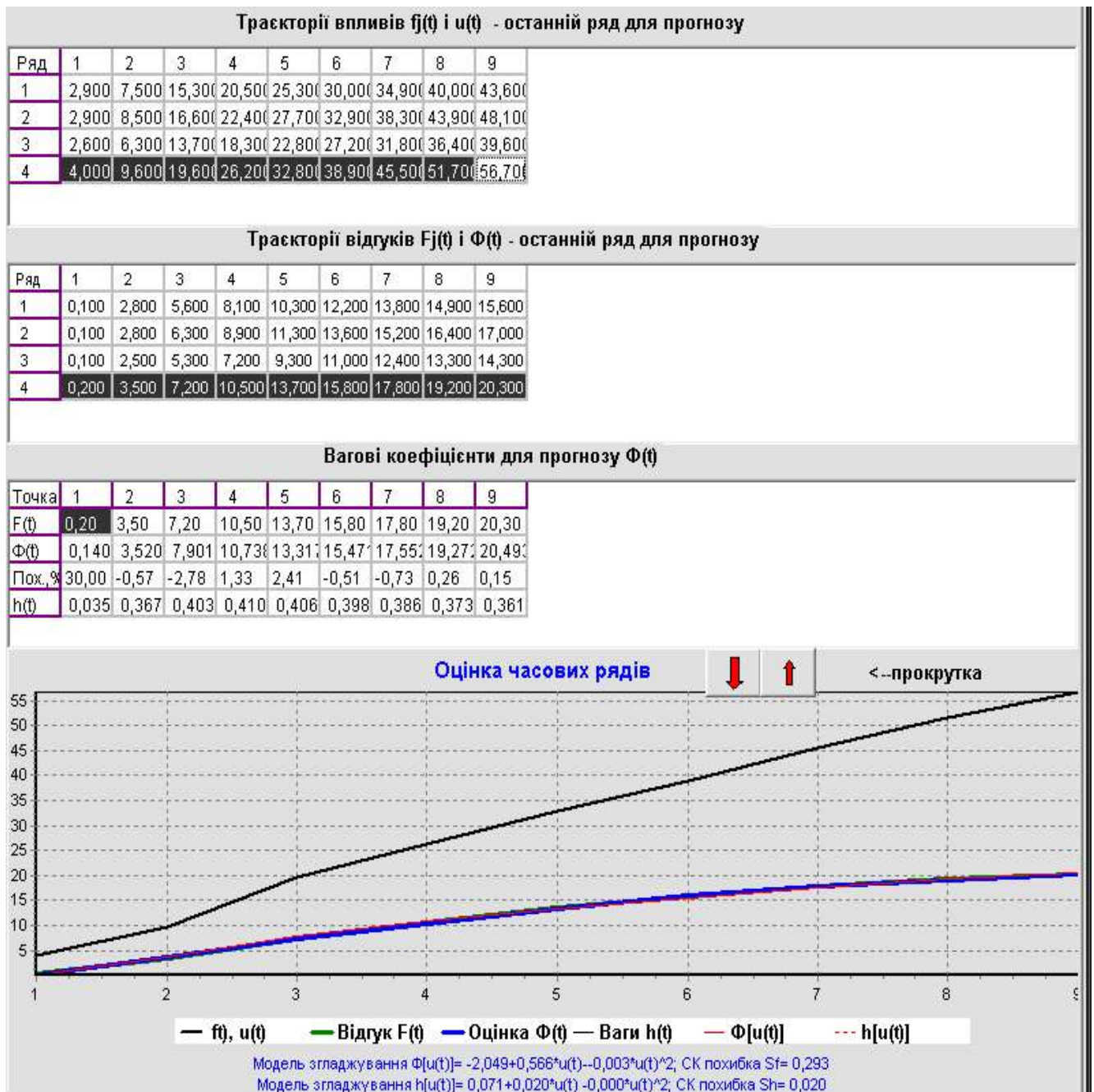


Рис. 2.8. Результати розрахунку прогнозних значень $\Phi(t)$

З аналізу результаті розрахунку бачимо, що при досить різноманітних вхідних сигналах, як у навчаючій вибірці, так і у прогнозованому процесі помилки прогнозування за винятком початкової точки 1 знаходяться у межах 3%. Можна констатувати, таким чином, що розроблена методика прогнозування динамічних рядів забезпечує достовірний прогноз і може

використовуватися при експериментальних дослідженнях зв'язаних рядів деформацій стиків верстатів.

2.3. Використання принципу подібності при діагностуванні деформаційних властивостей стиків

2.3.1. Загальні міркування

Для розуміння методу ідентифікації кривих «навантаження – деформація» розглянемо такий приклад. Хай криві $F_{e1}(p)$ і $F_{e2}(p)$ – еталонні (початкові) криві деформацій в стиках 1 і 2, а $F_{e\Sigma}(p)$ – еталонна крива в зоні вантаження, причому

$$F_{e\Sigma}(p) = F_{e1}(p) + F_{e2}(p). \quad (2.6)$$

Ті ж криві трансформуються після прироблення стиків (або тимчасовій релаксації) відповідно в $F_1(p)$, $F_2(p)$ і $F_\Sigma(p)$ з аналогічною властивістю

$$F_\Sigma(p) = F_1(p) + F_2(p). \quad (2.7)$$

Вважаючи те, що згідно (2.1)

$$F_1(p) \sim F_{e1}(p) R_1(p);$$

$$F_2(p) \sim F_{e2}(p) R_2(p),$$

отримаємо (2.6) у вигляді

$$F_\Sigma(p) \sim F_{e1}(p) R_1(p) + F_{e2}(p) R_2(p). \quad (2.8)$$

Оскільки $R_1(p)$ і $R_2(p)$ по умові – многочлени ступеня n :

$$R_1(p) = r_{10} + r_{11}p + r_{12}p^2 + \dots + r_{1n} p^n ;$$

$$R_2(p) = r_{20} + r_{21}p + r_{22}p^2 + \dots + r_{2n} p^n ,$$

то їх коефіцієнти легко можуть бути підібрані процедурою МНК.

Поширюючи формулу (2.8) на випадок K стиків, отримаємо

$$F_{\Sigma}(p) = \sum_{k=1}^K F_{ek}(p) R_k^n(p), \quad (2.9)$$

де $n = 1, 2, \dots = \text{const}$ для всіх k .

2.3.2. Тестування методу на еталонних діаграмах навантаження

Для обґрунтування застосування принципу подібності при діагностуванні деформаційних властивостей стиків була розроблена програма **DefStyk** (див. Додаток А) у інтегрованому середовищі програмування Borland Delphi 7.

Для тестування методу розглянемо приклад кривих навантаження, розглянутий в п. 2.2 (див. табл. 2.2). На рис. 2.9 і в табл. 2.3 представлені початкові дані і результати моделювання кривих навантаження цих стиків.

Таблиця 2.3

Результати виміру еталонних деформацій від параметру навантаження, мкм

№ точки на діаграмі навантаження									Позначення
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Параметр p
0	125	250	375	500	625	750	875	1000	Навантаження, Н
0,01	9	16,5	22	26,5	31	34	37	39	індикатор ПЕ1
0,02	2,5	4	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	індикатор ПЕ2
0,005	1,5	3	4	5	6	7	7,5	7,75	індикатор ПЕ3
0,03	2,4	4,4	5,6	6,4	7,2	8	8,8	9,4	індикатор ПЕ4
0,015	2	3,6	4,4	5,4	6,2	7	8	8,6	індикатор ПЕ5
0,06	11,4	20,9	27,6	32,9	38,2	42	45,8	48,4	індикатор ПЕ0

Примітка. Покази індикатора ПЕ0 є сумою показів індикаторів ПЕ1...ПЕ5.

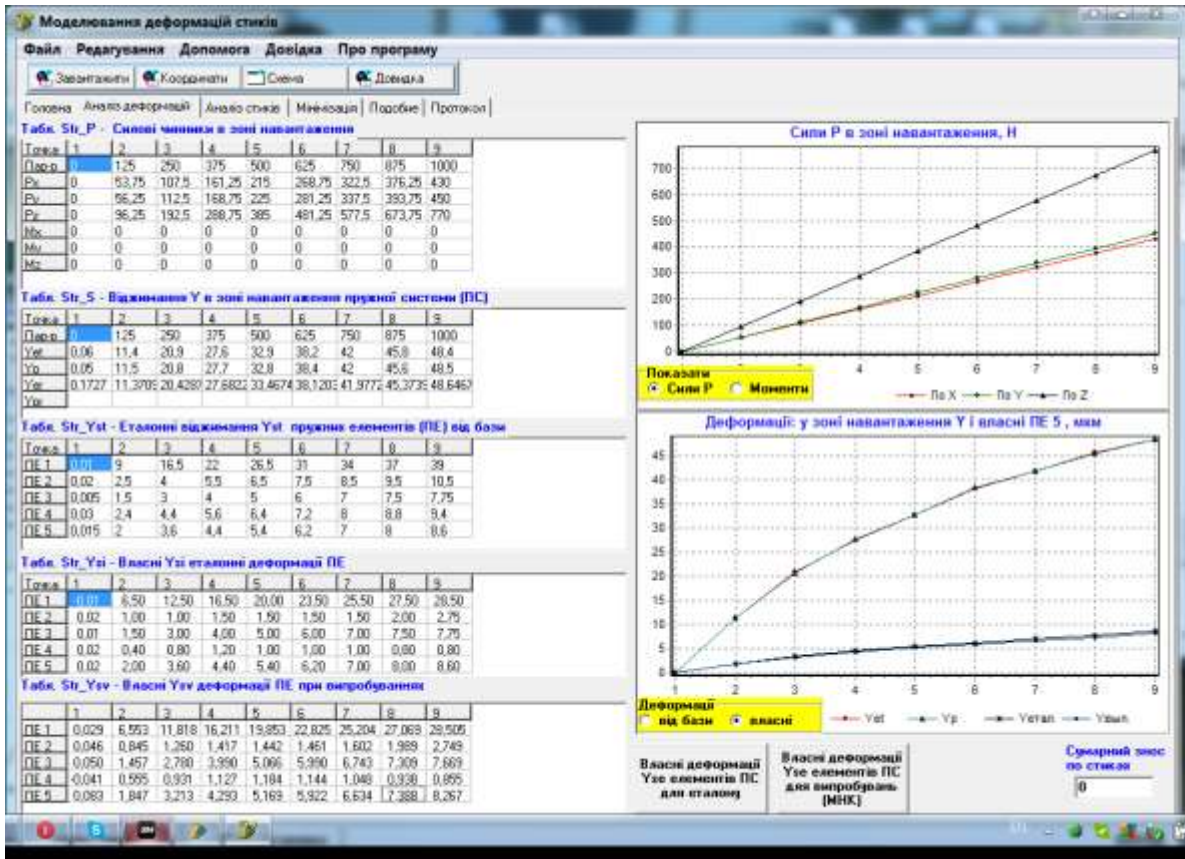


Рис. 2.9. Початкові дані і результати моделювання кривих навантаження

Точність відновлення (ідентифікації) кривих «навантаження – деформація» за показами індикаторів ПЕ1...ПЕ5 ілюструється таблицею на рис. 2.10 і рис. 2.11, з яких видно, що ступінь збігу дуже високий.

Табл. Str_Ysi - Власні Ysi еталонні деформації ПЕ

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПЕ 1	-0,01	6,50	12,50	16,50	20,00	23,50	25,50	27,50	28,50
ПЕ 2	0,02	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	2,75
ПЕ 3	0,01	1,50	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	7,50	7,75
ПЕ 4	0,02	0,40	0,80	1,20	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80
ПЕ 5	0,02	2,00	3,60	4,40	5,40	6,20	7,00	8,00	8,60

Табл. Str_Ysv - Власні Ysv деформації ПЕ при випробуваннях

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПЕ 1	0,029	6,553	11,818	16,211	19,853	22,825	25,204	27,069	28,505
ПЕ 2	0,046	0,845	1,260	1,417	1,442	1,461	1,602	1,989	2,749
ПЕ 3	0,050	1,457	2,780	3,990	5,066	5,990	6,743	7,309	7,669
ПЕ 4	-0,041	0,555	0,931	1,127	1,184	1,144	1,048	0,938	0,855
ПЕ 5	0,083	1,847	3,213	4,293	5,169	5,922	6,634	7,388	8,267

Рис. 2.10. Таблиці початкових Str_Ysi і відновлених програмою Str_Ysv кривих «навантаження – деформація» в точках вимірювань

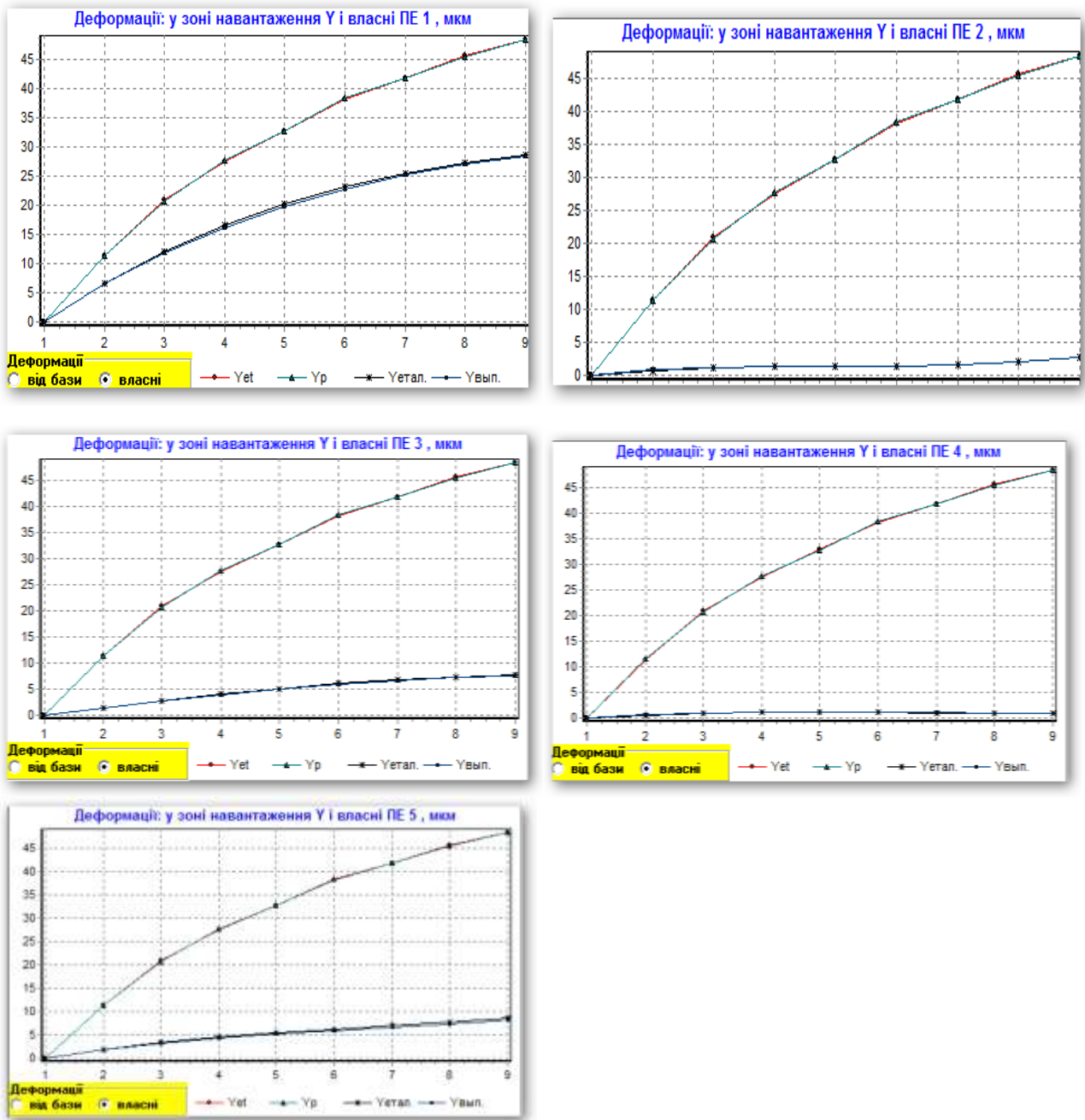


Рис. 2.11. Графіки відновлення кривих «навантаження – деформація» для стиків ПЕ1... ПЕ5

Як видно з рис. 2.11, ступінь співпадання еталонних ($Y_{етал}$) і відновлених ($Y_{вып}$) є дуже високою.

На рис. 2.12 показані результати мінімізації суми квадратів відхилень точок початкової і відновленої результуючих кривих навантаження методом комплексів [66]. Таблиця коефіцієнтів регресії для $n = 3$ приведена у верхній частині малюнка, при цьому параметром p є номер точки вимірювання.

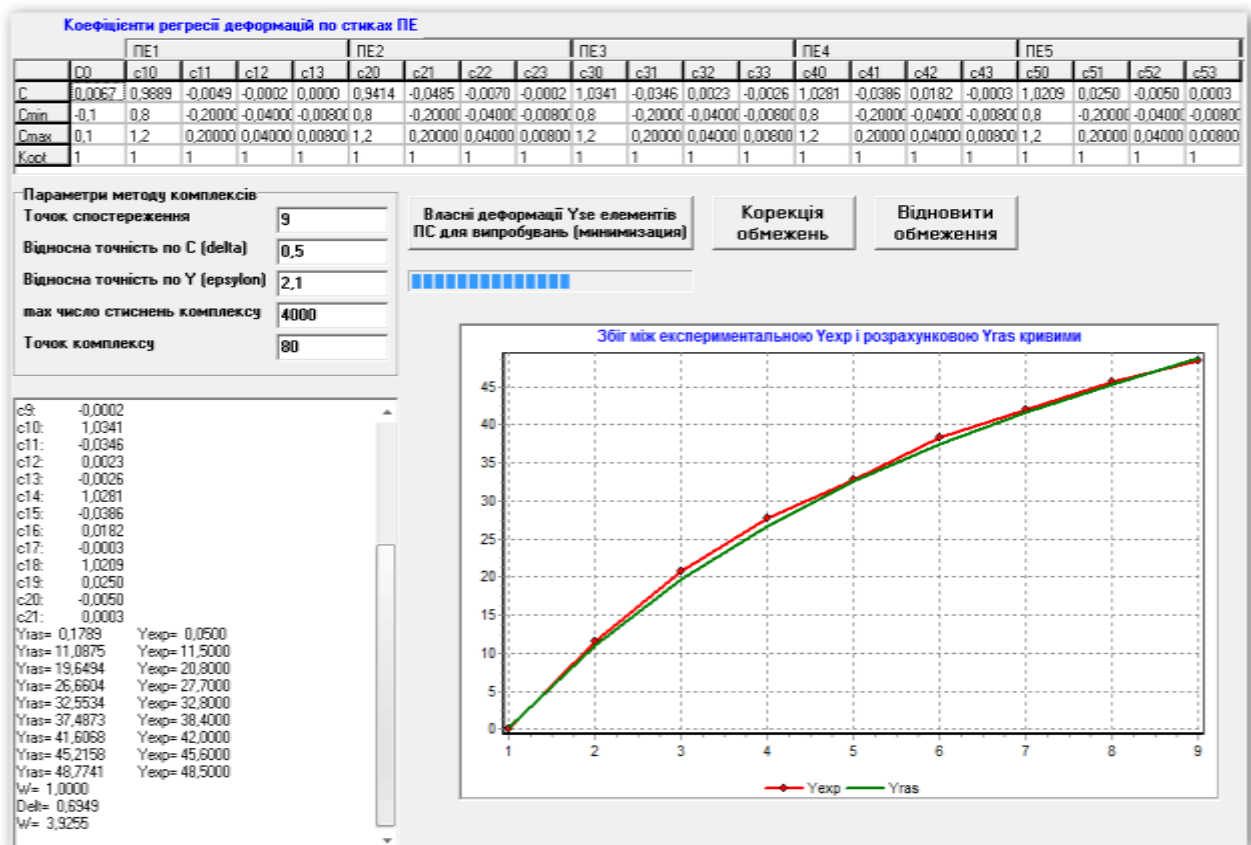


Рис. 2.12. Результати мінімізації суми квадратів відхилень початкової (еталонної) і відновленої результуючої кривої навантаження (ПЕ0) методом комплексів

2.3.3. Тестування методу при подібному деформуванні діаграм навантаження

Машинний експеримент на цьому етапі тестування полягав в тому, щоб ідентифікувати криві навантаження, штучно деформовані по умові подібності відповідно до формули (2.9). Таблиця даних (табл. 2.4) містить для пружних елементів ПЕ1 і ПЕ5 змінені дані в порівнянні з приведеними еталонами в табл. 2.3. При цьому деформованість ПЕ1 збільшується, а ПЕ5 зменшується в порівнянні з еталонними.

Результати моделювання приведені на рис. 2.13 – 2.16.

Таблиця 2.4

Виміряні деформації від параметру навантаження p (№ точки), мкм

№ точки на діаграмі навантаження									Позначення
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Параметр p
0	125	250	375	500	625	750	875	1000	Навантаження, Н
0	5,1	9,7	12,52	14,91	17,28	18,34	19,52	19,89	індикатор ПЕ1
0,02	2,5	4	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	індикатор ПЕ2
0,005	1,5	3	4	5	6	7	7,5	7,75	індикатор ПЕ3
0,03	2,4	4,4	5,6	6,4	7,2	8	8,8	9,4	індикатор ПЕ4
0,005	0,8	1,7	2,6	3,55	4,49	5,16	6,43	7,4	індикатор ПЕ5
0,06	12,3	22,8	30,22	36,36	42,47	47	51,75	54,94	індикатор ПЕ0

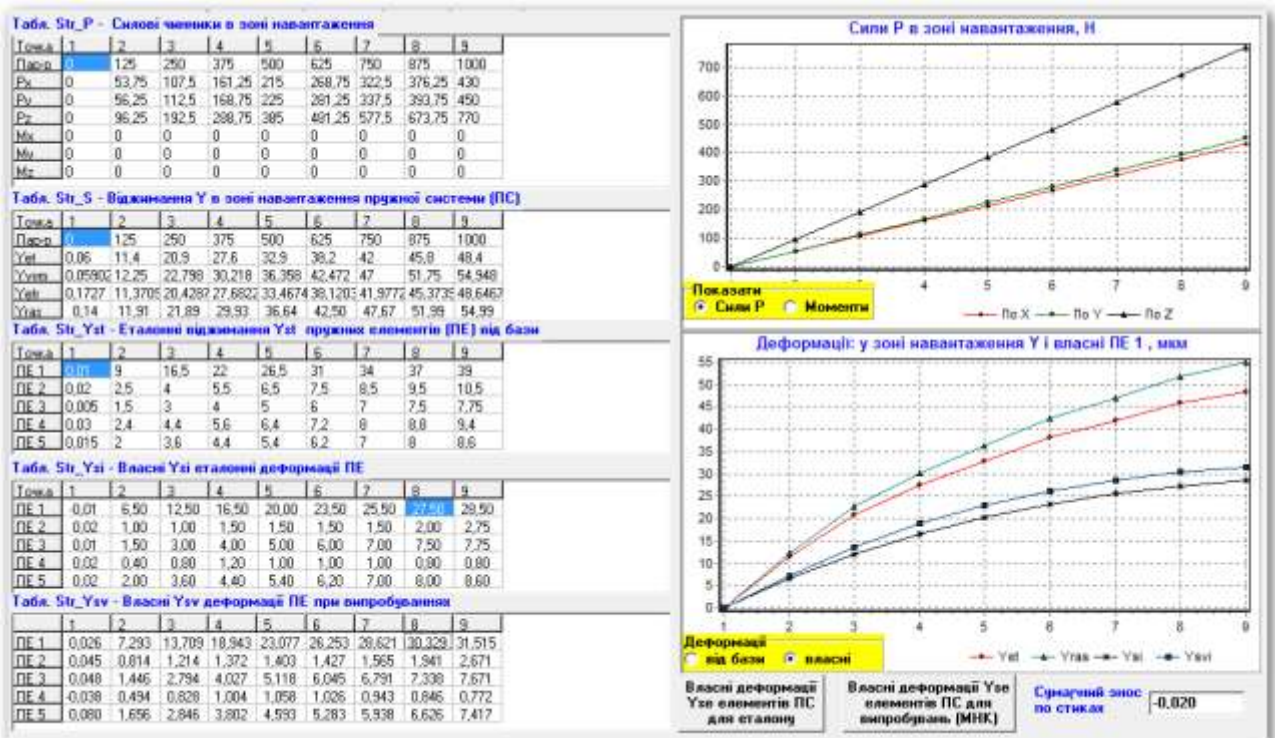


Рис. 2.13. Початкові дані і результати моделювання кривих навантаження за даними табл. 2.4

Точність відновлення (ідентифікації) деформованих кривих «навантаження – деформація» за показами індикаторів ПЕ1...ПЕ5 ілюструється таблицею на рис. 2.14 і графіками на рис. 2.15, з яких видно, що ступінь збігу також високий.

З рис. 2.13 видно, що для ПЕ1 відновлена крива Str_Ysv проходить вище за еталонну лінію Str_Ysi відповідно до таблиці на рис. 2.14.

Табл. Str_Ysi - Власні Ysi еталонні деформації ПЕ									
Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПЕ 1	-0,01	6,50	12,50	16,50	20,00	23,50	25,50	27,50	28,50
ПЕ 2	0,02	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	2,75
ПЕ 3	0,01	1,50	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	7,50	7,75
ПЕ 4	0,02	0,40	0,80	1,20	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80
ПЕ 5	0,02	2,00	3,60	4,40	5,40	6,20	7,00	8,00	8,60

Табл. Str_Ysv - Власні Ysv деформації ПЕ при випробуваннях									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПЕ 1	0,026	7,293	13,709	18,943	23,077	26,253	28,621	30,329	31,515
ПЕ 2	0,045	0,814	1,214	1,372	1,403	1,427	1,565	1,941	2,671
ПЕ 3	0,048	1,446	2,794	4,027	5,118	6,045	6,791	7,338	7,671
ПЕ 4	-0,038	0,494	0,828	1,004	1,058	1,026	0,943	0,846	0,772
ПЕ 5	0,080	1,656	2,846	3,802	4,593	5,283	5,938	6,626	7,417

Рис. 2.14. Таблиці початкових Str_Ysi і відновлених програмою Str_Ysv кривих «навантаження – деформація» в точках вимірювань

Це ж можна сказати і про криві Str_Ysi і Str_Ysv для ПЕ5, вони також відповідають таблиці на рис. 2.14. Для ПЕ2 ... ПЕ4 криві Str_Ysi і Str_Ysv практично співпадають

Слід також відзначити що при ідентифікації програма «Не бачить» значень в точках деформованих кривих ПЕ1 і ПЕ5, для неї відома тільки змряна крива $Yvum$ в таблиці «Віджимання в зоні навантаження пружної системи (ПС)» (див. рис. 2.13).

Таким чином, можна стверджувати, що запропонований метод діагностики на основі припущення про подібність зміни кривих «навантаження – деформація» дозволяє надійно ідентифікувати деформаційний стан стиків ТПС верстата.

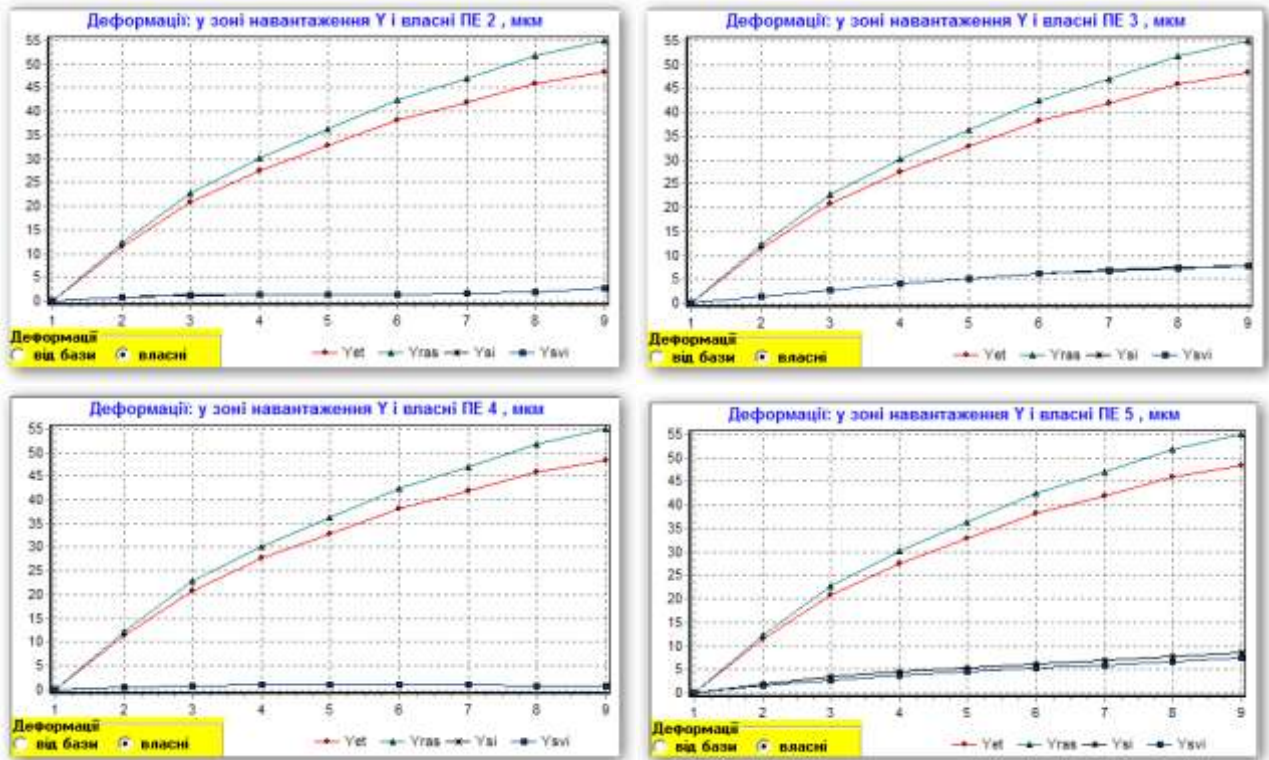


Рис. 2.15. Графіки відновлення кривих «навантаження – деформація» для стиків ПЕ2... ПЕ5

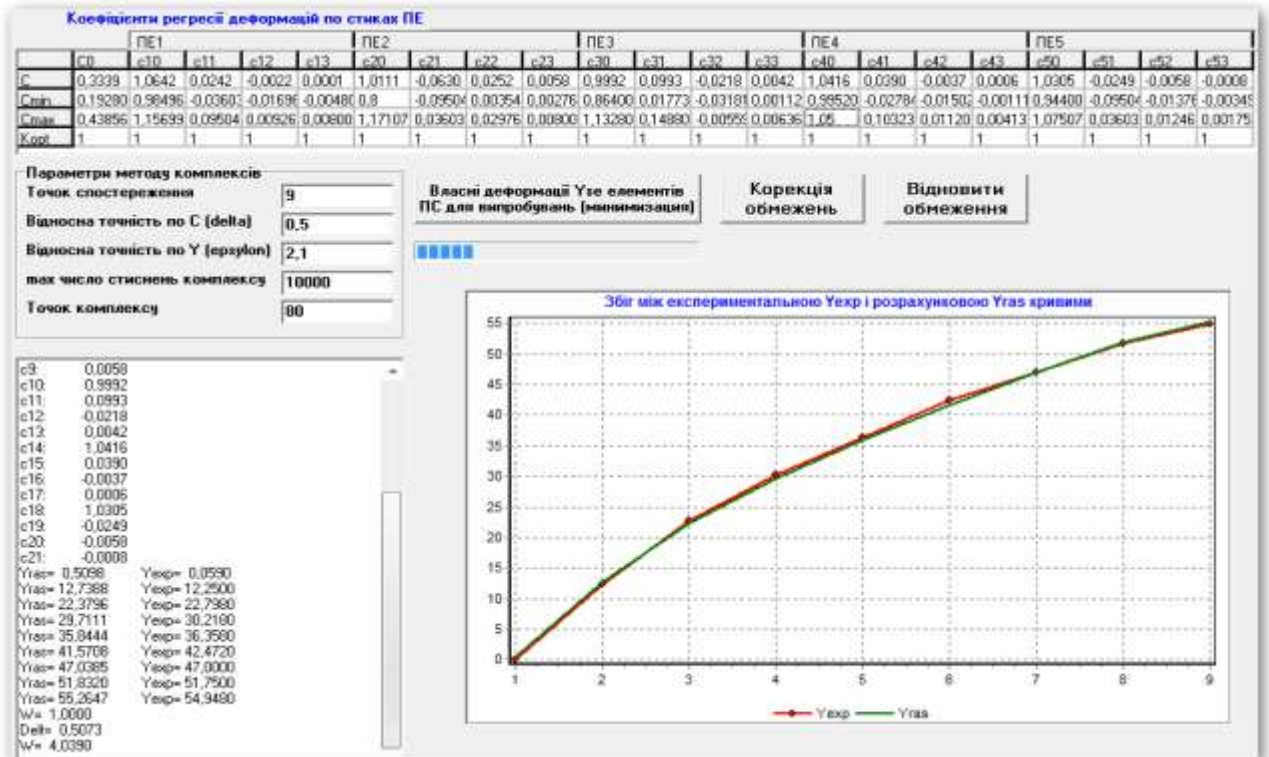


Рис. 2.16. Результати мінімізації суми квадратів відхилень початкової (еталонної) і відновленої результуючої кривої навантаження (ПЕ0) методом комплексів

2.4. Висновки по розділу 2

1. Обґрунтовано подібність процесів розвитку деформованості стиків.
2. Подібність процесів необхідно розглядати в середньому, а його межі визначаються допустимою середньою похибкою σ , або варіацією var_σ .
3. Обґрунтовано припущення про функціональний зв'язок між деформаційним процесом u , який вимірюється, і прихованим процесом Φ , який треба діагностувати.
4. Дослідження показали, що методика, яка пропонується, і програма, складена на її основі, дозволяють достатньо достовірно і оперативно діагностувати РД, які характерні для деформаційних характеристик стиків верстатів.
5. Тестування показало високу надійність і достовірність розроблених методики і програми.
6. Розроблені методики і програми можуть використовуватися при експериментальних дослідженнях і прогнозуванні точнісної якості металорізальних верстатів.

РОЗДІЛ 3

ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАЛАНСУ ДЕФОРМОВАНOSTІ СТИКІВ

Метою дослідження є розробка методики моделювання і автоматизація процесів ідентифікації балансу деформованості стиків МРВ за їх характеристиками в ТРП.

3.1. Постановка задачі ідентифікації і моделювання деформаційних властивостей стиків металорізальних верстатів

Розглянемо проблему на прикладі визначення похибки розміру деталі при обробці різцем з револьверного супорта на токарно-револьверному автоматі. Для аналізу використовуються результати дослідження технологічної надійності токарно-револьверних автоматів мод. 1Б118 Мелітопольського верстатобудівного заводу, які приведені в роботі А.С. Проникова [84].

Жорсткість автоматів в роботі визначалася по методиці точіння ступінчастого валу (виробничий метод), яка забезпечує можливість достатньо точно визначати сили різання і статичну жорсткість j_d технологічної системи в радіальному напрямі.

З аналізу схеми оброблення виходить (рис. 3.1):

1) похибка діаметрального розміру визначається розмірним ланцюгом з чотирьох послідовних з'єднань: а) горизонтальні направляючі станини– каретка корпусу револьверного супорта; б) револьверний супорт – опори револьверної головки; в) втулка фіксатора револьверної головки – фіксатор; г) вузол шпинделя (ШВ);

2) похибка оброблення в статиці визначається для трьох параметрів: діаметрального розміру, похибок форми в повздовжньому і поперечному напрямках, але залежно від мети випробувань їх набір може бути іншим;

3) похибка оброблення змінюється з часом із-за зношення контактних поверхонь стиків і від умов різання (сили, вібрації і тому подібне);

4) похибки стиків і їх деформації по різному впливають на всі види похибок оброблення, як по величині, так і по характеру цього впливу.

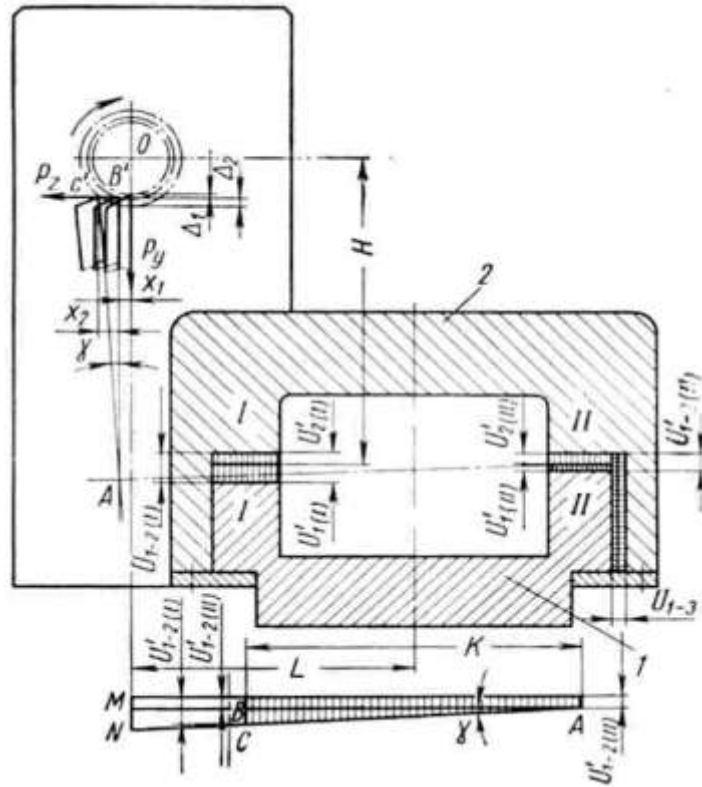


Рис. 3.1. Схема визначення похибки розміру деталі при обробленні різцем від револьверного супорта [84]: 1 – станина верстата; 2 – каретка револьверного супорта; I – передні горизонтальні направляючі станини і каретки; II – задні горизонтальні направляючі станини і каретки

Аналіз результатів дослідження [84] дозволив констатувати наступне :

1) регламентована проста стандартна перевірка сумарної жорсткості вузлів верстата дозволяє набути значення сумарних похибок і жорсткості для декількох вузлів одночасно, але вона ускладняє визначення внеску стику окремого вузла в загальний баланс, тобто «слабких місць» ТПС;

2) пружні деформації елементів ТПС і зношення з'єднань досить задовільно визначаються за допомогою існуючих методик їх аналітичного розрахунку;

3) прогнозування й діагностика точнісної надійності в процесі експлуатації верстатів вимагає регулярного проведення трудомістких і дорогих експериментальних випробувань, яка знижує їх ефективність.

Це визначає напрям вдосконалення загальної методики досліджень, який можна позначити наступним:

- 1) методика повинна бути зручною і не трудомісткою;
- 2) методика повинна дозволяти визначення внеску кожного окремого стику ТПС в загальний баланс похибок;
- 3) методика повинна мінімізувати витрати на проведення експериментальних випробувань;
- 4) методика повинна бути ефективною і гарантувати необхідний рівень достовірності і точності прогнозування технологічної надійності верстата в процесі його експлуатації.

Пропонована методика ґрунтується на використанні поняття фрактальності (Б. Мандельброт [48]), висновках про подібність процесів деформації (див. п. 2.3) та ітераційності процесів обчислень [94].

Розглянемо такий приклад. Хай маємо L стиків S_l , $l = \overline{1, L}$, які знаходяться в розмірному ланцюзі впливу на сумарну похибка Y (розмір, похибка форми і тому подібне) і які характеризуються діаграмами віджимань $y_l(p_i)$, $l = \overline{1, L}$; $i = \overline{1, I}$, де p_i – дискретні рівні навантажень (чинників) з постійним кроком $\Delta p_i = \text{const}$ приросту навантаження таким, що $p_{i+1} = p_i + \Delta p$. Тут мається на увазі, що навантаження є узагальненими і можуть мати різноманітну природу (сила різання, температурний тиск, амплітуда вібрацій і тому подібне). До того ж вони приведені до точки ТПС, в якій визначається кінцева похибка від навантажень, що додаються до l -го стику, і перераховуються відповідно до передавального числа розмірного ланцюга.

Початкова діаграма віджимань поверхонь стику, як правило, може бути достатньо точно апроксимована поліномом ступеня k :

$$\hat{y}_l(p) = b_{l0} + b_{l1}p + b_{l2}p^2 + \dots + b_{lk}p^k + \delta(p), \quad (3.1)$$

де b_k – коефіцієнт при членові k -го порядку в регресії оцінки віджимань $\hat{y}_l(p)$ в l -му стику; $\delta(p)$ – адитивна помилка оцінки.

Поведінка кожного l -го стику схильна до певних змін, які відбуваються або в часі (знос, прироблення, і тому подібне), або по положенню (зміна схеми навантаження в процесі оброблення, положення сили різання, і тому подібне) з дискретним кроком спостережень Δ_r , $r = \overline{1, R}$. Величина цих змін властива для поверхонь кожного l -го стику, і вона може описуватися теоретичною, або експериментальною регресійною залежністю вигляду:

$$\hat{z}_l(r) = c_l^{(0)} + c_l^{(1)}r + c_l^{(2)}r^2 + \omega(r), \quad (3.2)$$

де c_r – коефіцієнт регресії (або апроксимації) тренду $\hat{z}_l(r)$ порядку 0, 1, 2 (індекс в знаменнику) по номеру поточного кроку r в рядах з $r = \overline{1, R}$;

$\omega(r)$ – адитивна помилка регресії $\hat{z}_l(r)$.

Таким чином, оцінка $\Delta\hat{Y}_l$ внеску стику S_l в узагальнену похибку Y з обліком (3.1) і (3.2) складає:

$$\Delta\hat{Y}_l = \eta_l \cdot \hat{z}_l(r) \cdot \hat{y}_l(p), \quad (3.3)$$

де η_l – коефіцієнт передачі похибки l -го стику, який визначається з розмірного ланцюга.

При обробці партії деталей на верстаті можемо набути усередненого значення похибки $Y(p)$ при навантаженні p і конкретному значенні r , або, якщо вести спостереження по параметру r (це може бути час t , або інший), то маємо ряд $Y(p, r)$.

При адитивному додаванні похибок від L стиків оцінка загальної похибки $\Delta\hat{Y}$ визначиться з формули (параметр p може співпадати за змістом з параметром r):

$$\hat{Y}(p, r) = \sum_{l=1}^L \Delta \hat{Y}_l(p, r) = \sum_{l=1}^L \eta_l \cdot \hat{z}_l(r) \cdot \hat{y}_l(p). \quad (3.4)$$

Встає питання, яким чином з (3.4) набути значення $\Delta \hat{Y}_l(p, r)$, тобто визначити внесок кожного l -го стику в загальний баланс Y похибок оброблення? У такій постановці проблема набуває вигляду задачі ідентифікації $\Delta \hat{Y}_l(p, r)$. На основі її рішення можна ставити завдання як прогнозування технологічної надійності верстата, так і діагностики стану елементів його ТПС.

З цієї точки зору процес деформації ТПС МРВ представляється як класичний кібернетичний «чорний ящик», а головним завданням дослідження є виявлення функціональних зв'язків між вхідними і початковими сигналами цього об'єкту у вигляді (рис. 3.2).

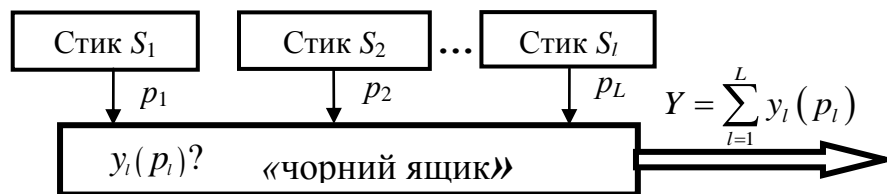


Рис. 3.2. Початкова структурна схема рішення задачі виявлення впливу навантажень p_l у стиках верстата на сумарну похибку Y

У загальному випадку чинники навантаження p_l можуть діяти по різних координатах, впливаючи на той же параметр точності Y . Так, при обробці різцем з револьверного супорта на стик горизонтальних направляючих станини і каретки діють 6 загальних силових чинників: три складових сили різання і три моменти від сил різання по координатах.

Позначимо координату впливу силового чинника індексом « i ». Тоді сумарну похибку від дії силового чинника p_i по всіх координатах на всі S_l стики в розмірному ланцюзі можна визначити з формули:

$$Y = \sum_{i=1}^I Y_i = \sum_{i=1}^I W_i(p_{1i} + p_{2i} + \dots + p_{Li}) = \sum_{i=1}^I w_{1i}(p_{1i}) + w_{2i}(p_{2i}) + \dots + w_{Li}(p_{Li}) = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L w_{li}(p_{li}), \quad (3.5)$$

де p_{li} – дискретні значення силових чинників в стиках S_l від впливу чинника P_i по i -ої координаті; $w_{li}(p_{li})$ – оператор перетворення силового чинника p_{li} в стиках S_l у складову y_{li} похибки Y_i ; Y_i – складова результуючої похибки від впливу P_i по i -ої координаті; W_i – оператор перетворення сумарної дії силових чинників p_{li} в стиках S_l в похибці Y_i .

З метою зменшення інформаційної ентропії «чорного ящика» проводиться декомпозиція загального завдання як по параметрах, так і по структурі. На відміну від початкової структури (див. рис. 3.2), у якій початковий сигнал Y_i містить змішаний вплив вхідних сигналів y_1, y_2, \dots, y_L . На наступному етапі сигнали y_l розділяються, але кожен з сигналів $y_l, l = \overline{1, L}$ також містить змішаний вплив вхідних сигналів p_1, p_2, \dots, p_L . Тобто сигнал Y_i формується як сума доданих похибок y_{li} усіх стиків S_l від впливу чинника P_i по кожній i -ій координаті.

Після декомпозиції початкового завдання з урахуванням багатокординатності впливу чинника p_i структурна схема на рис. 3.2 прийме вигляд рис 3.3. Для ідентифікації «чорного ящика» у такому вигляді була розроблена спеціальна методика, яка заснована на трьох основних припущеннях:

1) складові похибки y_{li} , які виникають в стиках S_l від впливу фактора P по кожній i – ій координаті, незалежні;

2) відсутні змішані впливи окремих чинників p_{li} на y_{li} , тобто $y_{li}(p_{li} \cdot p_{lj}) = 0, i \neq j$;

3) дійсний принцип суперпозиції, тобто сумарна похибка від дії силового чинника P зі всіх координат на всі стики S_l розмірного ланцюгу можна визначити як просту суму з (3.5).

Разом з припущеннями вводяться також додаткова умова: процес ϵ (або може бути) динамічним, тобто

$$p_{li} \equiv p_{li}(t); y_{li} \equiv y_{li}[\mathbf{x}(t)], l = \overline{1, L}, i = \overline{1, I}, \quad (3.6)$$

де t – час, або інший параметр, пов'язаний з дискретним параметром r ;

Ці припущення і додаткові умови є такими, які спостерігаються в реальності, і вони дозволяють побудувати математичну модель ідентифікації у вигляді системи лінійних ортогональних рівнянь.

Основна ідея, яка покладена в методику, полягає в тому, що $p_{li}(t)$ має свої особливості, тобто крива зміни $p_{li}(t)$ має властиві їй подібність і фрактальність. Природно вважати, що ці подібність і фрактальність є власними, властивим тільки їй, і відобразяться спотворенням на складову похибки $y_{li}[p_{li}(t)]$ в стику S_i з перетворенням $w_{li}[p_{li}(t)]$. Залишається тільки підібрати згідно прийнятими припущеннями і додатковими умовами найбільш «вдалиий» вид перетворення $w_{li}[p_{li}(t)]$ для формули (3.5).

Ідентифікація деформацій (зсувів) в стиках виконується згідно структурної схеми (рис. 3.4) в такій послідовності:

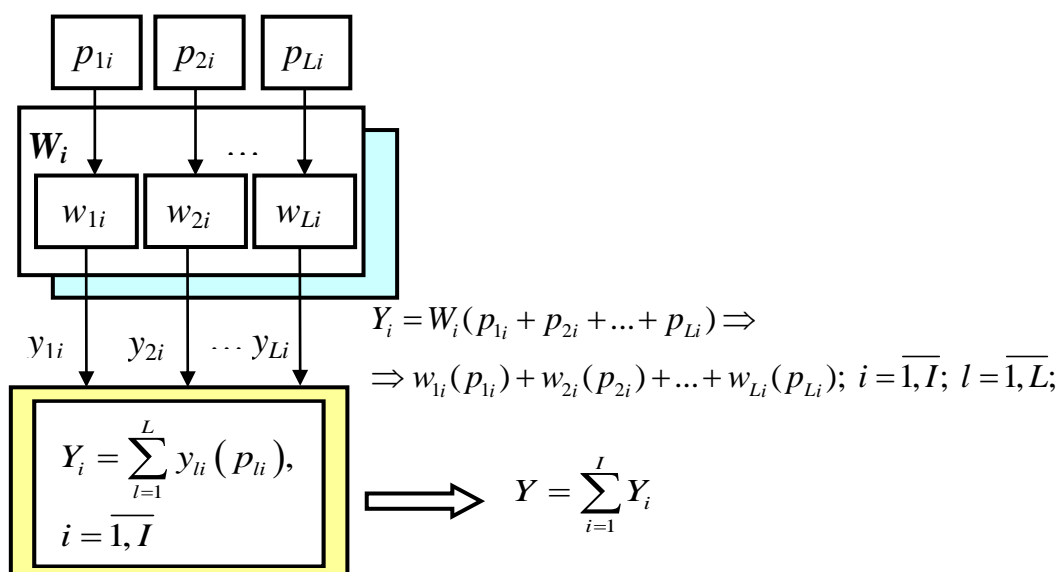


Рис. 3.3. Декомпозиція структурної схеми рішення задачі визначення впливу навантажень p_{li} у стиках на сумарну похибку Y

1. Вибирається узагальнений силовий чинник P (сила різання, амплітуда вібрацій і тому подібне) процесу різання для конкретного виду оброблення на верстаті і параметр якості Y (точність розміру, точність форми, шорсткість, і тому подібне).

2. Визначаються складові P_i по координатах.

3. Кінематичним розрахунком, або з бази даних визначаються коефіцієнти η_{li} передачі (впливу) P_i на l -ий стик S_l .

4. Визначаються навантаження $p_{li} = \eta_{li} \cdot P_i$.

5. Визначаються оцінки локальних зсувів \hat{y}_{li} у стиках комп'ютерною програмою **СТУК** (Додаток Б).

6. Геометричним розрахунком розмірного ланцюга, або з бази даних визначаються коефіцієнти λ_{li} передачі y_{li} для l -го стику S_l на координатну похибку $\hat{Y}_i = \hat{y}_{li} \cdot \lambda_{li}$.

7. Додаються оцінки похибок по всіх l стиках $\hat{Y}_i = \sum_{l=1}^L \hat{y}_{li} \cdot \lambda_{li}(p_{li}), \quad i = \overline{1, I}$.

8. Повторюються п.п. 2-7 для всіх $i = \overline{1, I}$ координат дії силового чинника P .

9. Визначаються розрахункова оцінка похибки \hat{Y} підсумовуванням похибок \hat{Y}_i по координатах дії силового чинника $\hat{Y} = \sum_{i=1}^I \hat{Y}_i$.

10. Виконуються статистичні процедури оцінки $\hat{y}_{li}, \hat{Y}_i, \hat{Y}$ їх порівнянням із спостережуваними даними.

11. Якщо статистичні оцінки $\hat{y}_{li}, \hat{Y}_i, \hat{Y}$ задовольняють на прийнятому рівні достовірності, то результати протоколюються. Інакше розглядається питання про перегляд початкових гіпотез, корекцію моделі і даних.

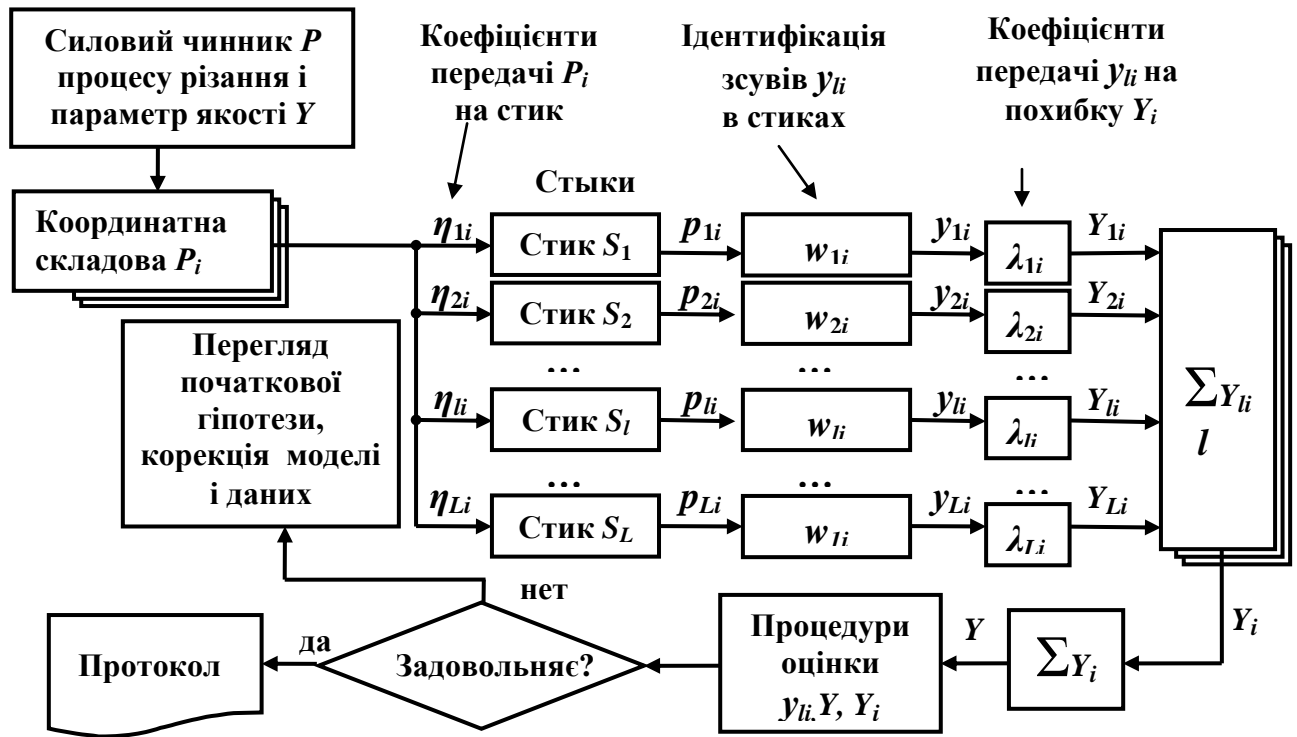


Рис. 3.4. Узагальнена структурна схема процедури визначення балансу зміщень

3.2. Математична модель процедури визначення балансу зміщень і програмна реалізація методики

У процесі моделювання за базисну математичну модель була прийнята загальна формула обчислення сумарних віджимань у вигляді:

$$\hat{Y} = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \left(c_{li}^{(0)} + c_{li}^{(1)} r + c_{li}^{(2)} r^2 \right) \cdot y_{li}^p \left(p_{li} \right), \quad (3.7)$$

де $c_{li}^{(\zeta)}$ – коефіцієнти тренду (по r) залежних змінних порядку l за номером точки r у ряду динаміки, $r = \overline{1, R}$; $\zeta = 0, 1, 2$; $y_{li}^p \left(p_{li} \right)$ – розрахункові залежні змінні, складові похибки у стику S_l від впливу по i -ій координаті; p_{li} – факторні (незалежні) змінні – силові фактори в стиках S_l від впливу по i -ій координаті.

Залежні змінні $y_{li}^p(p_{li})$ отримуються із нелінійної регресії x_j на y_k аналізом спостережених даних у вигляді поліноміальної моделі (3.1) k -го порядку.

Відповідно до структурної схеми декомпозиції (див. рис. 3.3) ідентифікація математичної моделі виконується поетапно для кожної i -ої координати навантаження P_i . Ціль ідентифікації – визначення модальних параметрів $c_{li}^{(\zeta)}$, які враховують тренд регресії $y_{li}^p(p_{li})$ вигляду (3.1) шляхом мінімізації суми квадратів відхилень $y_{li}^p(p_{li})$ від його спостереженого значення $y_{li}(p_{li})$ за період $1, 2, \dots, R$, що аналізується за критерієм МНК:

$$W_i = \sum_{r=1}^R \left[\sum_{i=1}^I \left(c_{li}^{(0)} + c_{li}^{(1)}r + c_{li}^{(2)}r^2 \right) \cdot y_{li}^p(p_{li}) - y_{li}(p_{li}) \right]^2 \rightarrow \min_{c_{li}^{(\zeta)}}; c_{li}^{(\zeta)} \in D_{li}; l = \overline{1, L}. \quad (3.8)$$

Підбір коефіцієнтів $c_{li}^{(\zeta)}$ проводиться за фрактальними особливостями фактичних значень $y_{li}(p_{li})$. У даному випадку мінімізація проводиться з використанням скалярної функції (3.8), а найкраще наближення визначається шляхом пошуку мінімуму цієї функції в просторі параметрів $c_{li}^{(\zeta)} \in D_i$.

Допустима область рішень D_i для кожного i -ої координати являє собою множину точок $\mathbf{c}_{kj}^{(\zeta)} = \left(c_{li}^{(0)}, c_{li}^{(1)}, c_{li}^{(2)} \right); l = \overline{1, L}; i = \overline{1, I}$ із $3L$ -вимірному простору параметрів \mathbf{E}^{3L} .

$$D_i = \left\{ \mathbf{c}_{li}^{(\zeta)} \in \mathbf{E}^{3L} : C_{li}^{(\zeta)-} \leq C_{li}^{(\zeta)} \leq C_{li}^{(\zeta)+}; l = \overline{1, L}; \zeta = \overline{0, 2} \right\}, \quad (3.9)$$

де $C_{li}^{(\zeta)-}, C_{li}^{(\zeta)+}$ – відповідно нижній і верхній межі варіювання $C_{li}^{(\zeta)}$.

Таким чином завдання зводиться до багатопараметричної задачі умовної мінімізації з досить складною поверхнею пошуку, для якої не можна

застосувати жодного аналітичного методу розв'язування. Тому для ідентифікації параметрів моделі використовується обчислювальна процедура, що одержала назву методу комплексів (метод Бокса [66]), яку довелося модифікувати з умовами особливості даної задачі.

Для автоматизації процесу моделювання створено програму **СТУК** (див. Додаток Б) у середовищі програмування Borland Delphi 7.

Програмний засіб **СТУК** дозволяє визначити взаємозв'язки та вплив факторних ознак p_{ii} на результативні показники $y_{ii}^p(p_{ii}, r)$, використовуючи інструментарій кібернетичного моделювання. Програма забезпечує введення даних, їх коректування, пошук, оброблення необхідної інформації для моделювання деформацій стиків, графічне відображення та протоколювання вихідних даних.

3.3. Структура і параметри задачі визначення балансу зсувів токарно-револьверного автомата

3.3.1. Постановка задачі

Розглянемо визначення балансу зміщень елементів ТПС верстата в похибці розміру деталі при обточуванні ступінчастого валика (див. рис. 3.1), тобто параметр Y якості Δd – відхилення діаметру валика від настановного по ступенях валику. Прийmemo $R = 9$ – кількість ступенів валика. Розглянемо випадок дослідження впливу на похибці оброблення таких сполучень:

- 1) шпindelний вузол (ШВ) із станиною по стику «ШВ – станина»;
- 2) револьверна головка з револьверним супортом по стику «револьверна головка (по посадочних шийках) – револьверний супорт»;
- 3) револьверний супорт з горизонтальними направляючими станини по стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини».

Враховуємо, що ШВ і револьверна головка мають внутрішні стики. Так, ШВ має стики в підшипникових вузлах, револьверна головка включає стик «фіксатор – корпус». Тому оцінка деформацій буде для них змішаною.

Для виявлення внеску окремих внутрішніх стиків потрібно збільшувати кількість стиків в моделі (параметр), або розглядати ці вузли окремо за принципом декомпозиції. Для кожного вузла введемо локальну систему координат, яка співпадає з системою координат верстата: три лінійні координати x, y, z по напрямку сил різання, що становлять P_x, P_y, P_z і три кутові координати $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ у напрямі дії моментів сил різання M_x, M_y, M_z (рис. 3.5).

У бік супортної групи маємо два стики: 2 і 3 з перерахованих вище. З силових чинників на них діють тільки складові сили різання по координатах: P_x, P_y, P_z . Згідно рис. 3.5 у площині стику, «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» діятимуть приведені сили Q_x, Q_y, Q_z і приведені моменти L_x, L_y, L_z . Коефіцієнти впливу y_{li} на Y_i можна отримати розмірним розрахунком, як це виконано в роботі [84].

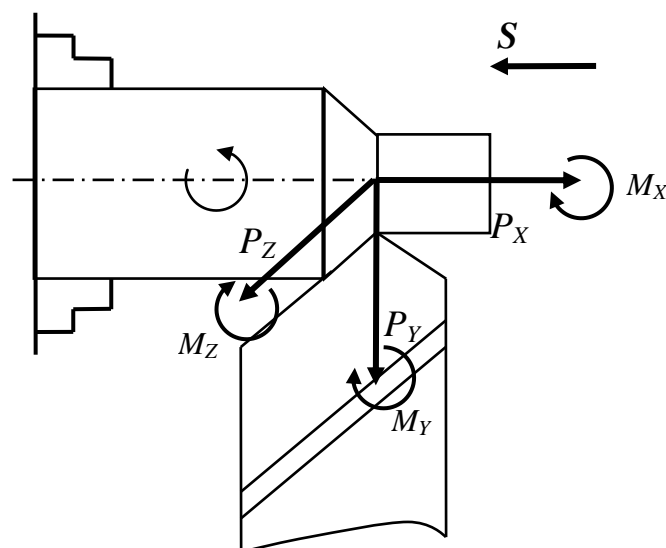


Рис.3.5. Система координат

3.3.2. Структура задачі

Було проведено тестування програми за даними задачі, яке показало що при збільшенні фрактальності кривих $y_{li}^p(p_{li}, r)$ від параметру r доцільніше застосовувати регресію змін (3.7) у більш простішому вигляді

$$\hat{y}_{li}^p(p) = p_{li}; l = \overline{1, L}; i = \overline{1, I}. \quad (3.10)$$

Це надає сенс мультиплікатору $(c_{li}^{(0)} + c_{li}^{(1)}r + c_{li}^{(2)}r^2)$ в (3.7), як рівню похибки $y_{li}^p(p_{li}, r)$ від одиничного впливу p_{li} (наприклад $p_{li} = 1$ Па) по i – ої координаті на стик S_l , що досить зручно при аналізі. Але при досить гладких і монотонних $y_{li}^p(p_{li}, r)$, більш точні оцінки $C_{li}^{(\xi)}$ можна отримати при підборі регресору $\hat{y}_{li}^p(p)$ з набором коефіцієнтів b в (3.1), які надають найбільше значення коефіцієнту детермінації R^2 [36].

При тестуванні використовувалася абстрактна модель при $I = 3$ (кількість координат дії силового фактору P), $L = 3$ (кількість стиків). На рис. 3.11. структурна схема тестової задачі, в табл. 3.1 – значення коефіцієнтів передачі η_{li} і λ_{li} .

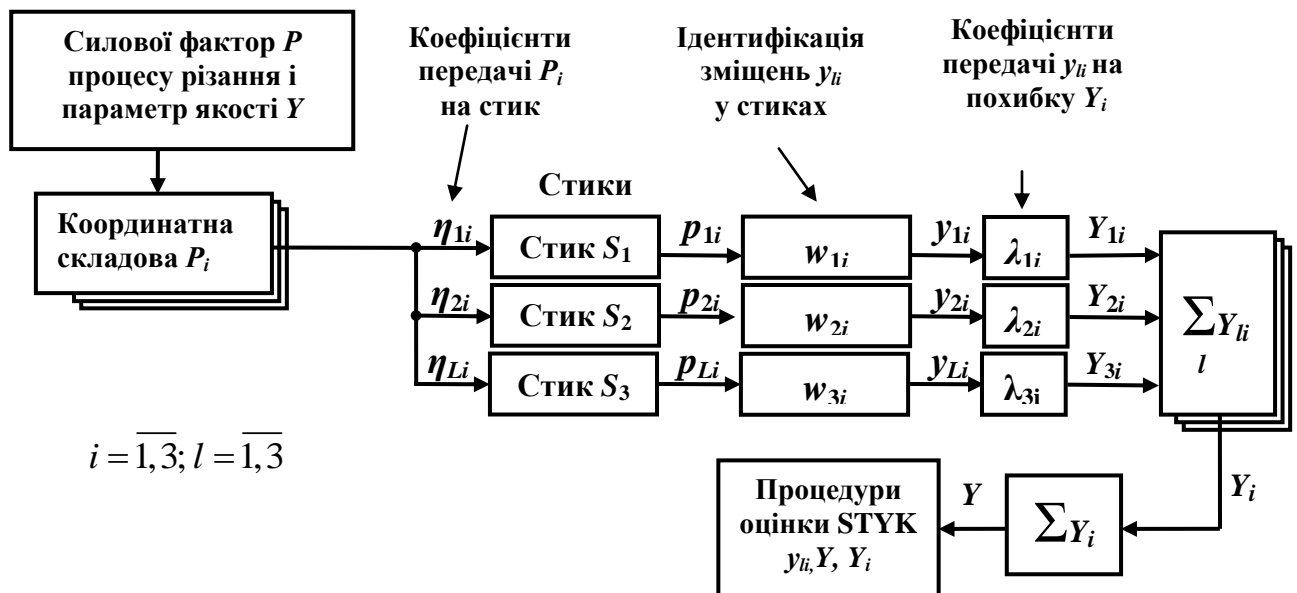


Рис. 3.11. Структурна схема тестової задачі

Таблиця 3.1

Коефіцієнти передачі η_{ii} і λ_{ii}

Стик l	Коефіцієнти передачі P_i на p_{ii}			Коефіцієнти передачі y_{ii} на Y_i		
	η_{11}	η_{12}	η_{13}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}
1	0,382	0,101	0,596	0,899	0,885	0,958
2	0,014	0,407	0,863	0,139	0,245	0,045
3	0,032	0,164	0,220	0,017	0,285	0,343

3.3.3. Параметри задачі

Розглянемо визначення балансу зміщень елементів пружної системи верстата похибки розміру деталі при обточуванні ступінчастого валику, тобто параметр якості Y це Δd – відхилення діаметру валика від установочного по ступенях валику. Прийнемо $R = 9$ – кількість ступенів валику.

Розглянемо випадок дослідження впливу на похибку оброблення спряжень:

- 1) шпиндельний вузол (ШВ) зі станиною (див. рис 3.1) по стику «ШВ – станина»;
- 2) револьверна головка з револьверним супортом по стику «револьверна головка (по посадочних шийках) – револьверний супорт»;
- 3) револьверний супорт з горизонтальними направляючими станини по стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини».

Врахуємо, що ШВ і револьверна головка мають внутрішні стики. Так, ШВ має стики у підшипникових вузлах, револьверна головка включає стик «фіксатор – корпус». Тому оцінка деформацій буде для них змішаною. Для виявлення внеску окремих внутрішніх стиків треба збільшувати кількість стиків у моделі (параметр), або розглядати ці вузли окремо за принципом декомпозиції. Для кожного вузла введемо локальну систему координат, яка співпадає з системою координат верстату: три лінійних координати x , y , z за

напрямком складових сил різання P_x, P_y, P_z і три кутових координати $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, які спрямовані в напрямку дії моментів сил різання M_x, M_y, M_z (рис. 3.12).

У бік супортної групи маємо два стики: 2 і 3 із перерахованих вище. Із силових факторів на них діють тільки складові сили різання по координатах: P_x, P_y, P_z . Згідно рис. 3.12 у площині стиків «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» будуть діяти приведені сили Q_x, Q_y, Q_z і приведені моменти L_x, L_y, L_z . Виконуючі це приведення отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_x &= P_x; Q_y = P_y; Q_z = P_z; \\ L_x &= P_y \cdot L + P_z \cdot H; L_y = P_x \cdot L + P_z (X + R); L_z = P_y (X + R) + P_x \cdot H. \end{aligned} \quad (3.11)$$

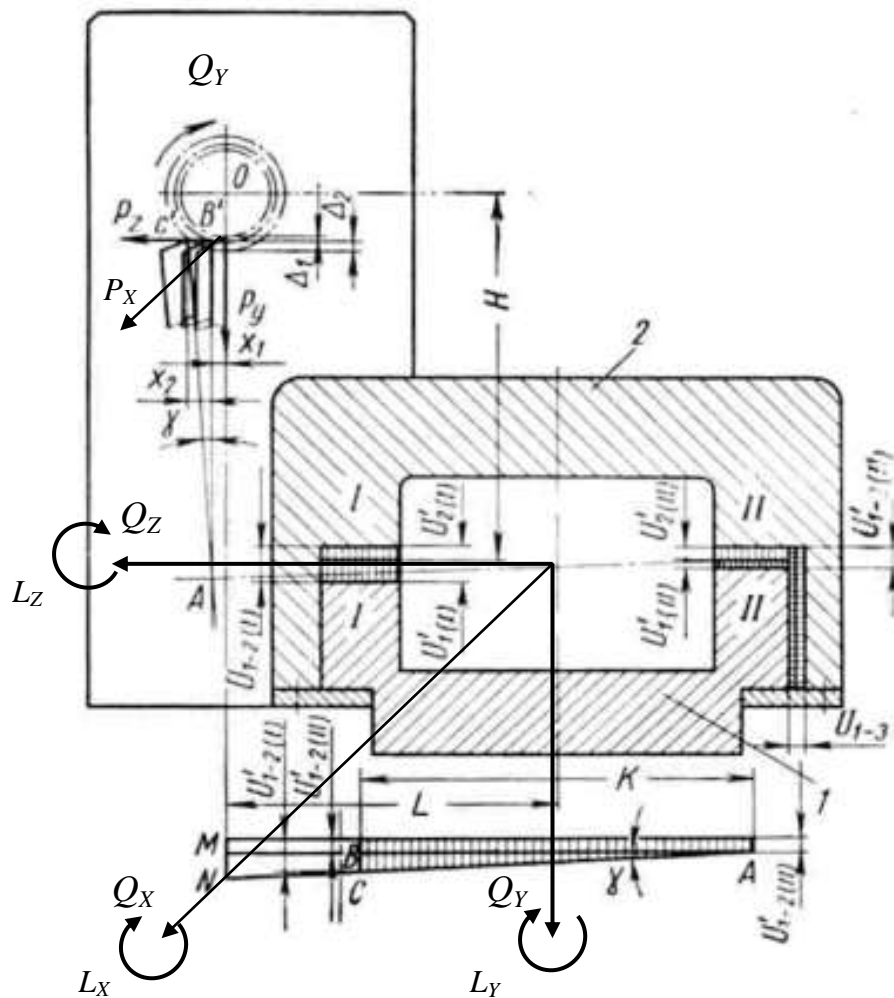


Рис. 3.12. Приведення сил Q_x, Q_y, Q_z і моментів L_x, L_y, L_z у площині стиків «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини»

Згідно цієї схеми табл. 3.1 для стику 3 «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» буде мати вигляд табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Коефіцієнти передачі η_{li} для стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини»						
Стик 3, коорди ната i	Коефіцієнти передачі для стику S_3 по координатах i					
	31	32	33	34	35	36
Корд.	X	Y	Z	φ_x	φ_y	φ_z
η_{zi}	P_x	P_y	P_z	$P_y \cdot L + P_z \cdot H$	$P_x \cdot L + P_z \cdot (X + R)$	$P_y \cdot (X + R) - P_x \cdot H$
λ_{zi}	-	$U''_{1-2(l)}$	U^2_{1-3}/d	$[U'_{1-2(l)} - U'_{1-2(l)} \cdot (H-d/2)]^2 / K^2 / d$	-	$[U'_{1-2(l)} - U'_{1-2(l)}] \cdot (L+X) / L$
N_{i} індік.	2	3	7	3, 4	2, 6	3, 4

Примітка. Деформації стику у напрямках X і φ_y не впливають на точність розміру.

З табл. 3.2. бачимо, що для визначення сумарної похибки Δd від усіх видів деформацій стику 3 необхідно мати залежності (3.1) у вигляді $y_{zi}(p_{zi}, r)$. В табл. 3.2 це параметри зміщень і поворотів по відповідних координатах. Такі залежності можна отримати експериментально після періоду прироблення стиків верстату. Параметр r при цьому може бути або часовим, або позиційним. За базу вимірювань слід обирати вузол, з яким спряжений даний. Так за базу даного вузла (каретка револьверної головки) треба обрати станину верстата.

При дослідженні деформацій стику револьверна головка навантажувалася ступінчасто в діапазонах реальної зміни складових сил різання P_x , P_y , P_z . Схема перевірки жорсткості револьверного супорта показана на рис. 3.13. Пристрій (тарований динамометр) навантаження кріпиться в одне з гнізд револьверної головки. Напрямок навантажуючої сили – по рівнодіючій складових P_z , P_y и P_x . Навантаження збільшується через 200 Н. Точкою додатків сили є облямовування в шпинделі (без цанги) на вильоті 45 мм від торця шпинделя. Складові сил різання відповідно рівні: $P_z=110\text{Н}$, $P_y=450\text{Н}$, $P_x=430\text{Н}$.

Оброблювалася заготовка довжиною $l = 20$ мм і діаметром $d = 18$ мм.
 Параметри робочої області верстата: $X = 45$ мм і $H = 50$ мм.

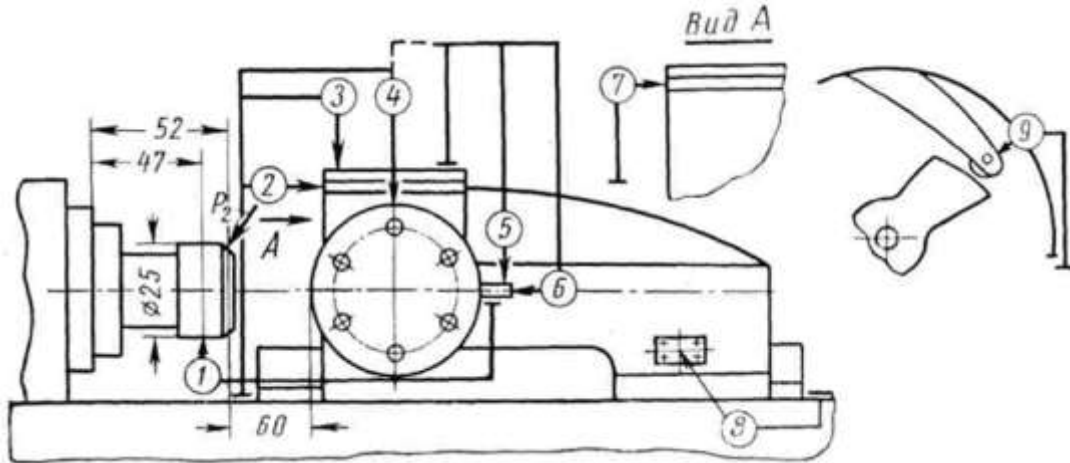


Рис. 3.13. Схема навантаження револьверного супорта автомата моделі 1Б118[84]: 1-9 –номера індикаторів

Моменти в стику від сил різання надані у табл. 3.4. Діаграма віджимань револьверного супорта показана на рис. 3.14.

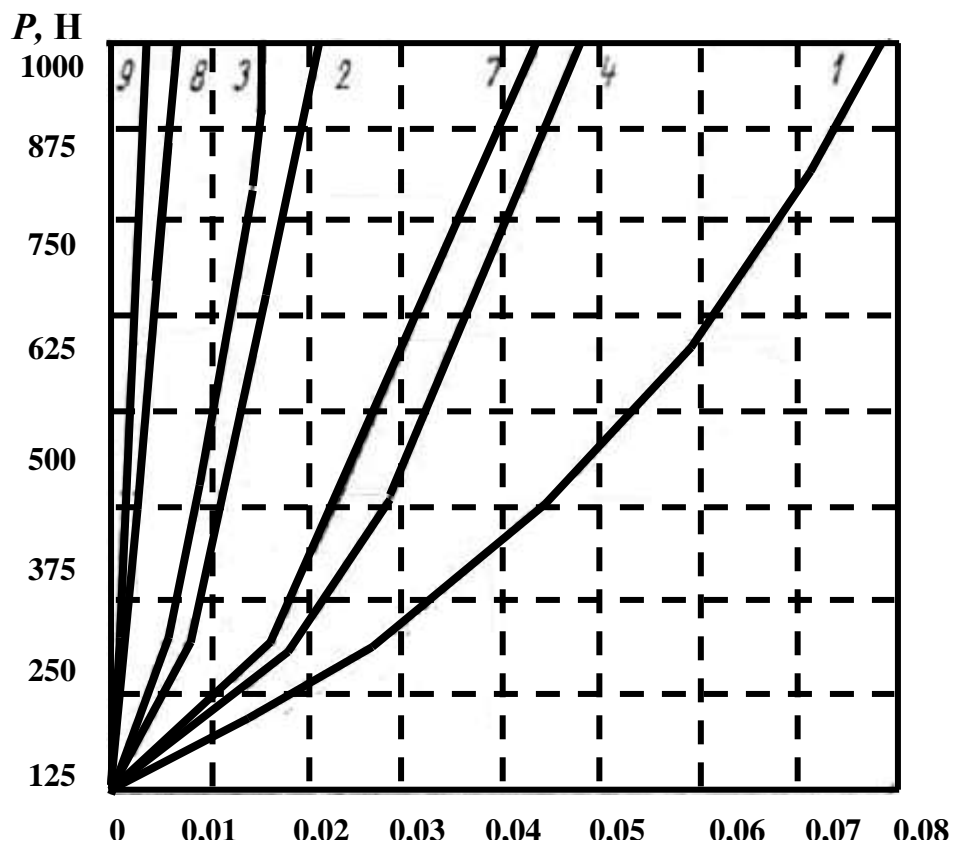


Рис. 3.14. Діаграма віджимань револьверного супорта автомата моделі 1Б118. Цифрами вказані номери індикаторів при вимірюваннях

Таблиця 3.3

Навантажувальні характеристики стику
«направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини»

Сила	Величини складових сили різання, кН								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	0	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1
P_z	0	0,0963	0,193	0,2888	0,385	0,4813	0,5775	0,674	0,77
P_y	0	0,0563	0,113	0,1688	0,225	0,2813	0,3375	0,394	0,45
P_x	0	0,0538	0,108	0,1613	0,215	0,2688	0,3225	0,376	0,43
Індикатор	Покази індикаторів, мм								
1	0	0,018	0,033	0,044	0,053	0,062	0,068	0,074	0,078
2	0	0,005	0,008	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019	0,021
3	0	0,003	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,015	0,015
4	0	0,012	0,022	0,028	0,032	0,036	0,04	0,044	0,047
7	0	0,01	0,018	0,022	0,027	0,031	0,035	0,04	0,043
8	0	0,003	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,015	0,015
9	0	0,0005	0,001	0,0015	0,0025	0,003	0,0035	0,004	0,0045

Таблиця 3.4

Моменти в стику від сил різання

Моменти у стику від сили P_x , Нм									
P_x	0	53,75	107,5	161,25	215	268,75	322,5	376,3	430
$L_z = P_x H$	0	2,6875	5,375	8,0625	10,75	13,438	16,125	18,81	21,5
Моменти у стику від сили P_y , Нм									
P_y	0	56,25	112,5	168,75	225	281,25	337,5	393,8	450
$L_x = P_y L$	0	1,125	2,25	3,375	4,5	5,625	6,75	7,875	9
$L_z = P_y (X + d/2)$	0	3,0375	6,075	9,1125	12,15	15,188	18,225	21,26	24,3
Моменти у стику від сили P_z , Нм									
P_z	0	96,25	192,5	288,75	385	481,25	577,5	673,8	770
$L_x = P_z H$	0	4,8125	9,625	14,438	19,25	24,063	28,875	33,69	38,5
$L_z = P_z (X + d/2)$	0	5,1975	10,4	15,593	20,79	25,988	31,185	36,38	41,58

Зміщення в зоні різання від силових факторів у стику наведені у табл. 3.5. Графіки і регресори зміщень у стику 3 «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» від силових факторів у стику по координатах наведені на рис. 3.15 - 3.18.

Таблиця 3.5

Зміщення в зоні різання від силових факторів у стику

Силовий фактор	Зміщення в зоні різання $y_{3i}(r)$ на рівнях навантаження r								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_x \lambda_{31}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$P_y \lambda_{32}$	0,0	3,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	15,0	15,5
$P_z \lambda_{33}$	0,0	0,6	1,8	2,7	4,1	5,3	6,8	8,9	10,3
$P_x \lambda_{34}$	0,0	0,3	0,9	1,5	1,8	2,1	2,5	3,1	3,6
$P_y \lambda_{35}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$P_z \lambda_{36}$	0,0	2,9	5,2	6,5	7,2	7,8	8,5	9,4	10,2

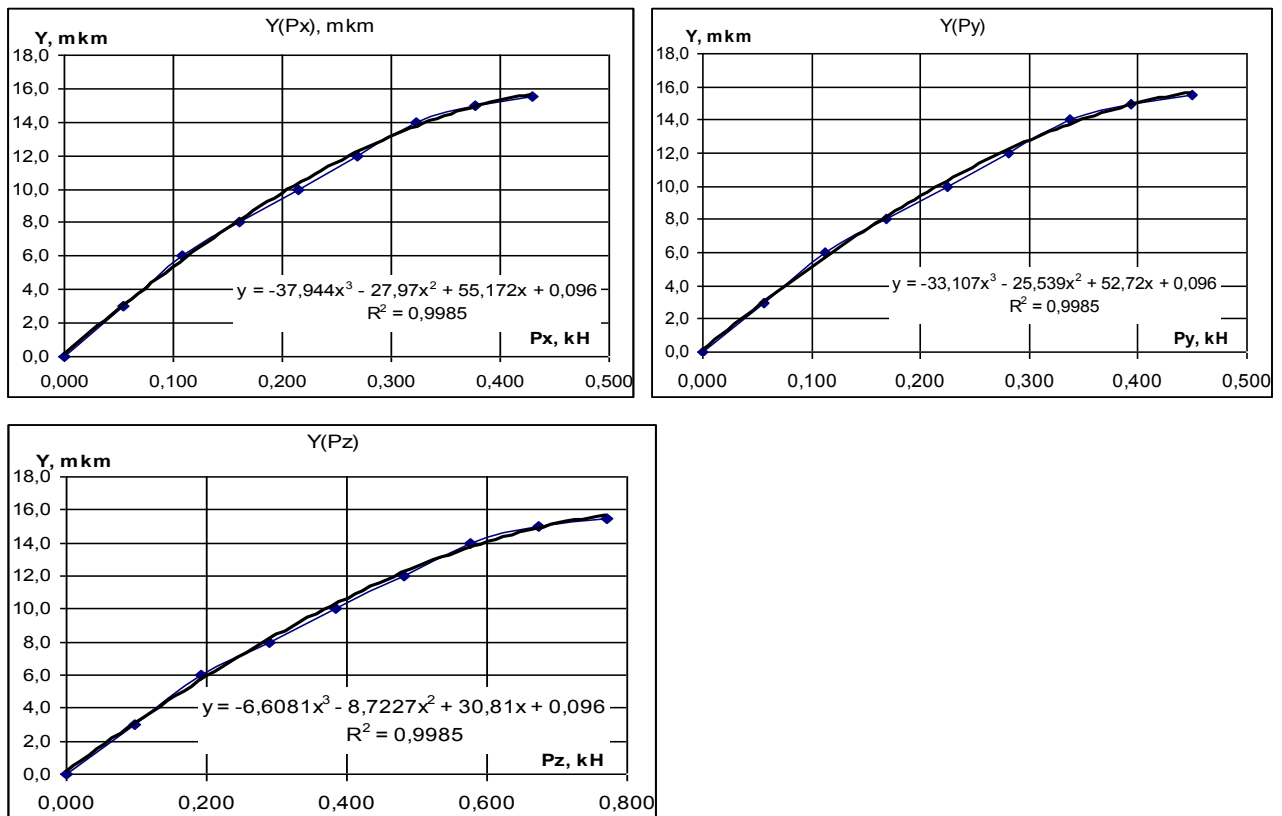


Рис. 3.15. Графіки і регресори зміщень від силових факторів у стику по координаті Y

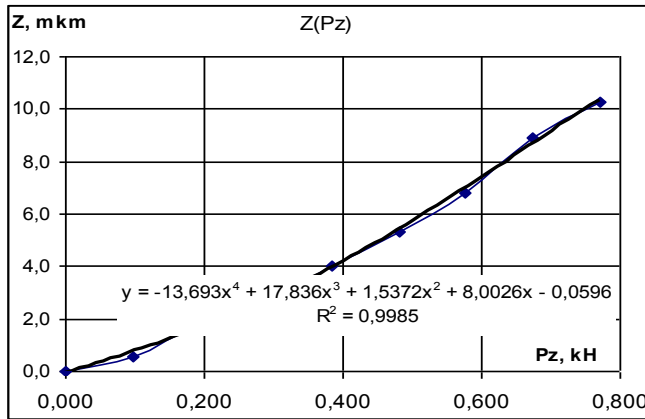
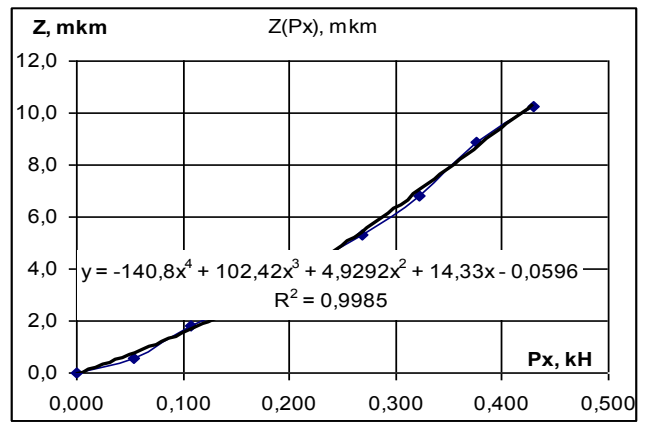
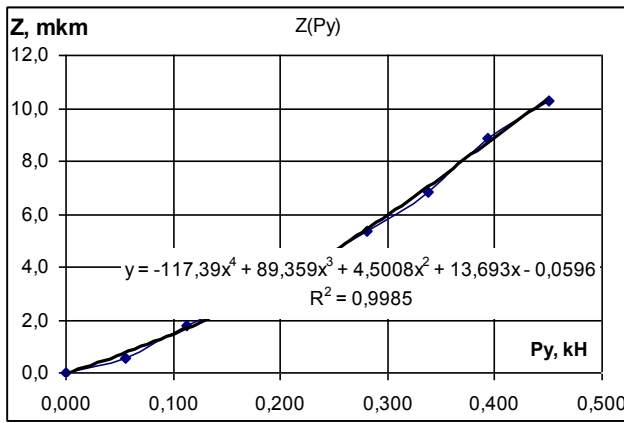


Рис. 3.16. Графіки і регресори зміщень від силових факторів у стику по координаті Z

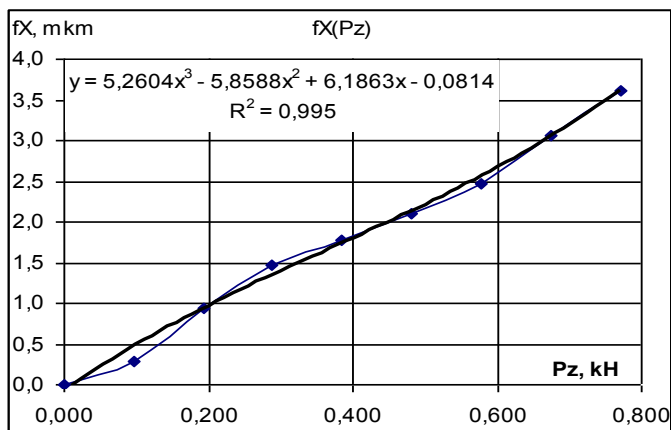
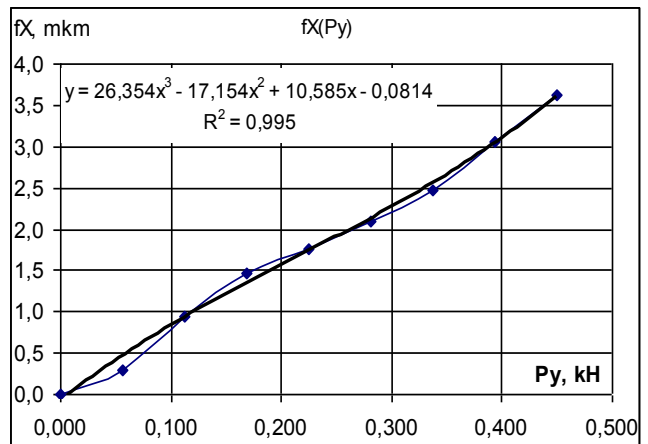
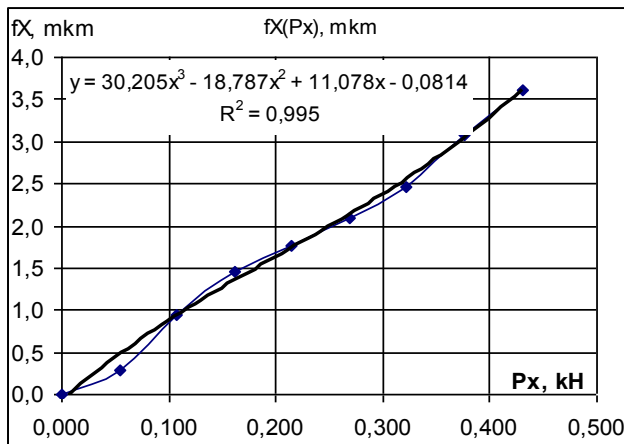


Рис. 3.17. Графіки і регресори зміщень від силових факторів у стику по координаті φ_X

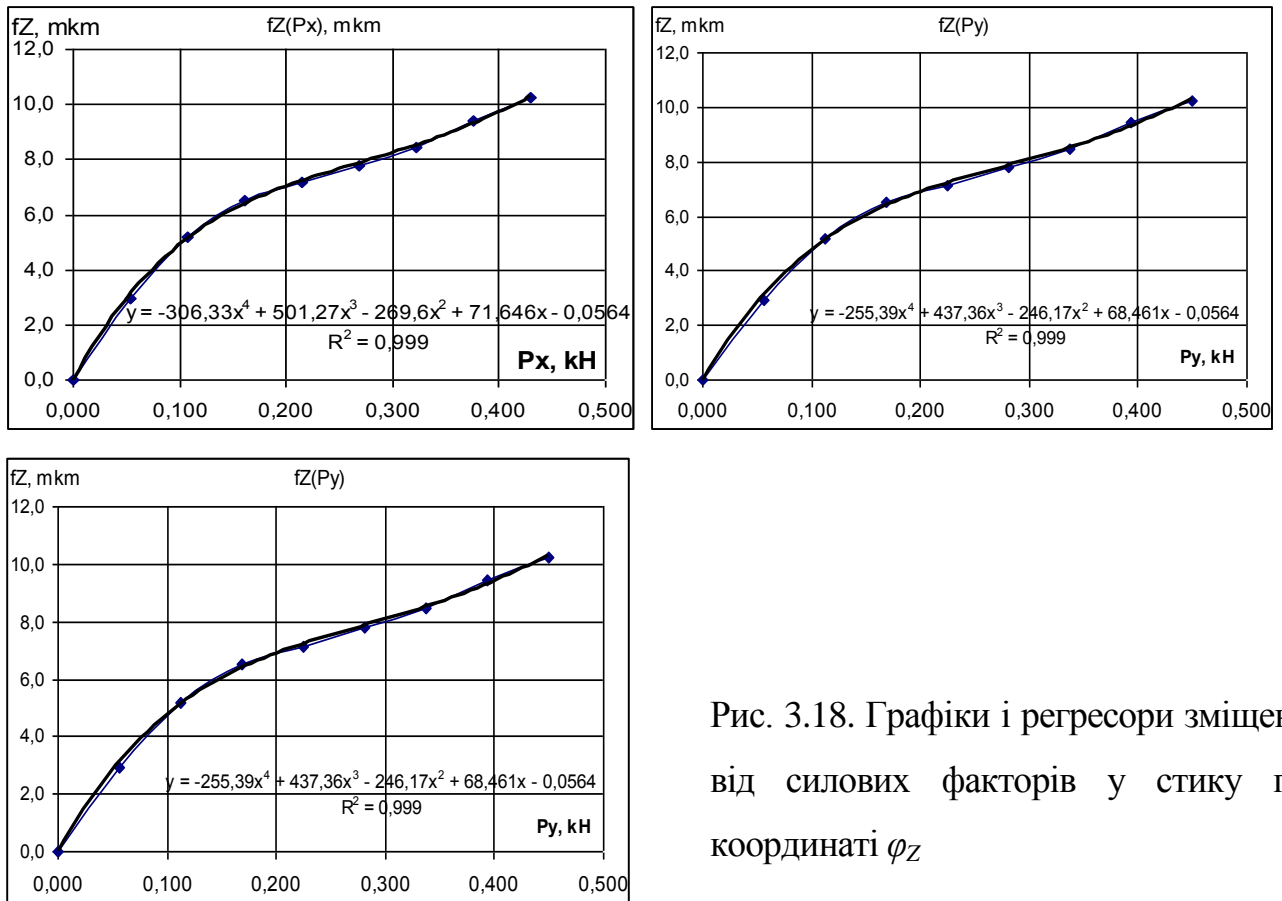


Рис. 3.18. Графіки і регресори зміщень від силових факторів у стику по координаті φ_Z

3.4. Комп'ютерне моделювання похибки оброблення від зміщень у стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» та інтерпретація результатів

Моделювався вплив навантаження стику «направляючі каретки – горизонтальні направляючі станини» на похибку діаметру обробленої деталі при обробленні з револьверного супорту (див. п. 3.3).

Вихідні дані для моделювання надані на вкладці «Головна» (див. рис. 3.19). На рис. 3.20 - 3.22 показано відповідне:

1) збіг теоретичної і експериментальної кривих похибки розміру при дії силового фактору у стику по координаті X , двобічний довірчий інтервал похибки по залишках склав 0,739 мкм (рис. 3.20);

2) характер зміни кожної складової (моди) деформації при дії силового фактору у стику по координаті X , з якого бачимо, що найбільший внесок в похибку дає мода 2, якій відповідає сила різання P_y (рис. 3.21);

3) на рис 3.22 показано внесок моди 1 (сила різання P_y) при дії силового фактору в стику по координаті X в загальний баланс деформацій по цій координаті.

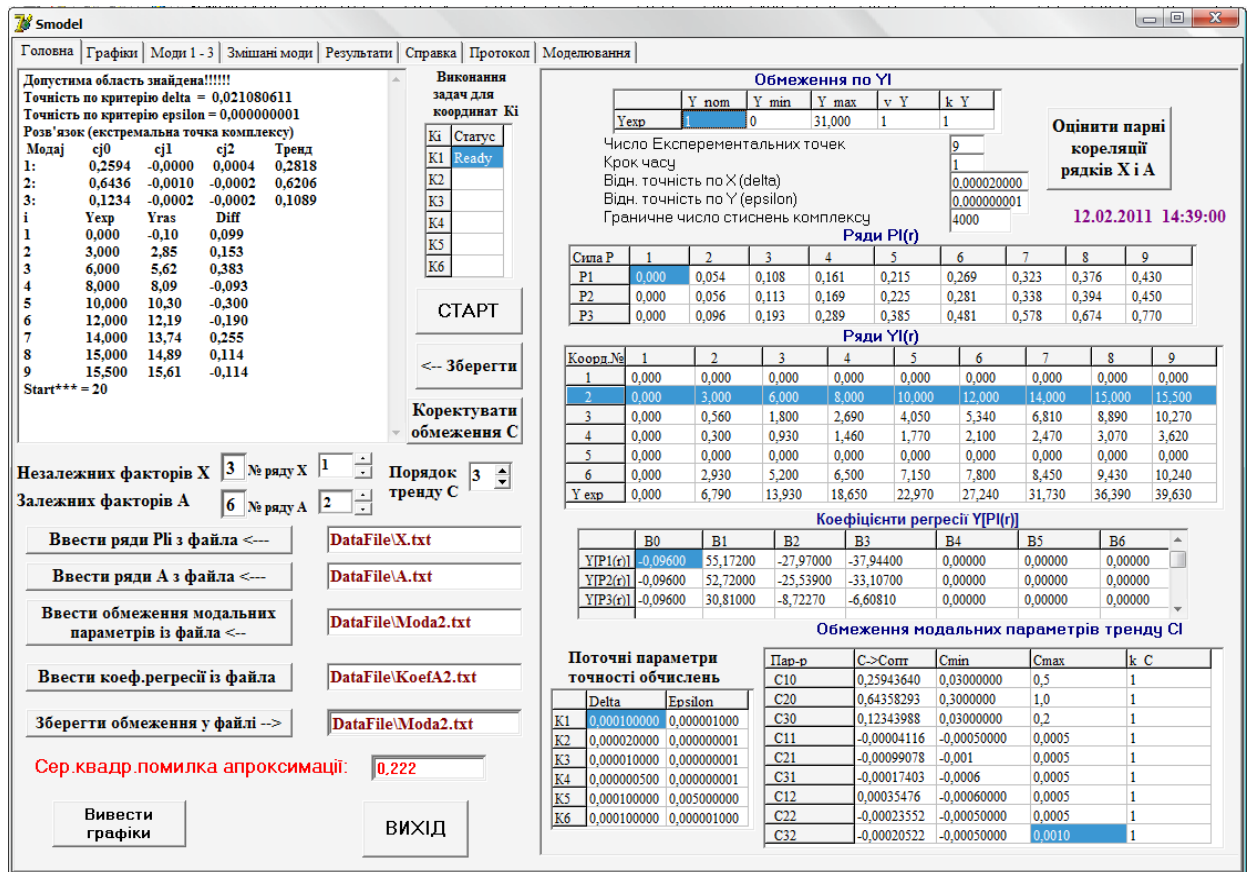


Рис. 3.19. Головне вікно програми STYK. Вихідні дані і результати моделювання

Моделювання виконується серіями, до трьох серій, для статистичного оцінювання результатів. Тобто у даному випадку реалізується концепція так званого машинного моделювання. На рис. 3.23 показано результати моделювання для двох серій, з яких видно, що найбільш вдалою серією є перша, оскільки для неї середнє квадратичне відхилення по загальній похибці складає 0,070 мкм. Це відображено у таблиці «Результати розрахунку Y по r ». В тій же таблиці надається оцінка відтворюваності машинного експерименту за

критерієм Кохрена, при цьому розрахункова оцінка з двох серій $G_P = 0,5766$ менше табличної $G_{KP} = 0,6385$ [55] – гіпотеза про відтворюваність підтверджується.

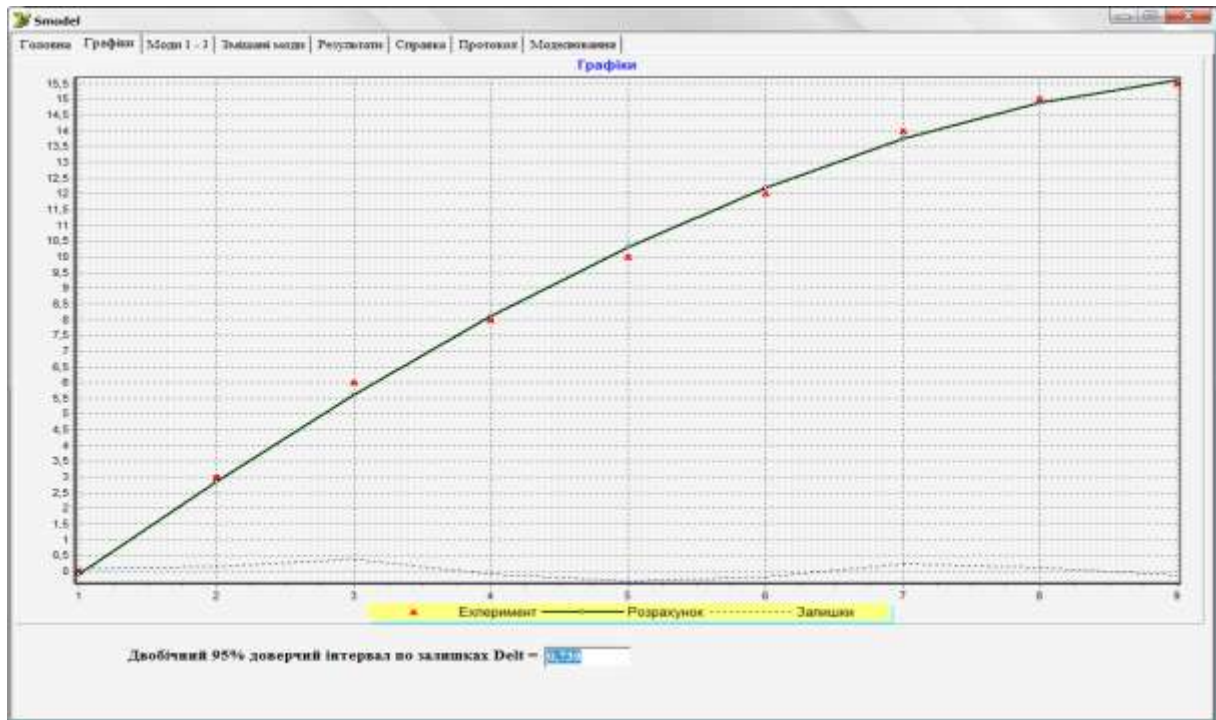


Рис. 3.20. Вкладка «Графіки» програми STYK. Збіг теоретичної і експериментальної кривих похибки розміру при дії силового фактору у стику по координаті X

На графіках рис. 3.24 показано експериментальної і модельованої похибки, а також залишки як різниця $Y_{\text{експ.}} - Y_{\text{расч.}}$. Максимальний залишок складає 0,858 мкм, середній – 0,087. Двобічний довірчий інтервал складає тільки 0,318 мкм. Тобто точність відтворювання є дуже високої.

На графіках рис. 3.24 - 3.26 показано вкладки «Моделювання» програми STYK для аналізу впливу на загальну похибку складових сил різання P_x, P_y, P_z (відповідно силові фактори P_1, P_2, P_3) по координатах стику $Y, Z, \varphi_x, \varphi_z$ і разом по усіх тих самих координатах (рис. 3.27 і 3.28). Сили, що діють P_x, P_y, P_z наведені в таблицях «Ряди $Pl(r)$ » вкладки «Головна» (див. рис. 3.19) при ступінчастому навантаженні в 9-ьох точках.

Так сила P_x (силової фактор P1) при її значенні $P_y = 0,430$ кН в 9-ій точці дає загальну похибку розміру оброблення $\Delta d_1 = 7,7$ мкм, а найбільша координатна складова $\Delta d_{2-3} \approx 3,2$ мкм від сили P_z по координаті стику Z (див. рис. 3.24).

Сила P_y (силовий фактор P2) при її значенні $P_y = 0,450$ кН в 9-ій точці дає загальну похибка розміру оброблення $\Delta d_2 = 20$ мкм, а найбільша координатна складова $\Delta d_{2-5} \approx 6$ мкм від моменту L_y по координаті стику φ_y (див. рис. 3.25).

Сила P_z (силовий фактор P3) при її значенні $P_z = 0,770$ кН в 9-ій точці дає загальну похибка розміру оброблення $\Delta d_3 = 12$ мкм, а найбільша координатна складова $\Delta d_{3-4} \approx 4,8$ мкм від моменту L_x по координаті стику φ_x (див. рис. 3.26).

Сумарна похибка від обох силових факторів P1, P2 і P3 (див. рис. 3.27, 3.28) в тій самій точці навантаження складає $\Delta d_\Sigma = 40$ мкм, а вплив окремих координатних складових практично однаковий близько 9 мкм. Це говорить перш за все про рівножорстку конструкцію стиків револьверного супорту, що досягнуто напевно еволюційним шляхом вдосконалення супортів автоматів.

Отримані моделюванням результати досить точно збігаються з результатами, які отримані в роботі [84], де віджимання каретки в вертикальній площині по вертикальній осі складало при тих самих умовах $\Delta d_\Sigma = 47$ мкм, але як бачимо з табл. 3.2 складові сили різання діють не однозначно на величини деформацій у стику. Тому збіг можна вважати задовільним, але це питання вимагає додаткових досліджень.

На вкладці «Моделювання» програми STYK (див. рис. 3.24 - 3.28) показано ще одну важливу для аналізу таблицю «Прогноз до 12 точки навантаження $P(r)$ », зміст якої приведений у табл. 3.6. У цієї таблиці можна увести будь-які довільні значення складових сил різання у стовпчики: P_1, P_2, P_3 і розрахувати відповідні до них значення похибок розміру оброблення у стовпчиках: Пом.1, Пом.2, Пом.3, а також сумарне значення цих параметрів. Вони ж відображаються на графіках.

Так можна ввести, скажімо, складові сили різання при обробці по іншій схемі, коли різець встановлюється не знизу, а збоку.

В останньому стовпчику табл. 3.7 ступень впливу складових силових факторів на сумарну похибку оброблення. Для сил різання P_x , P_y , P_z ці частки відповідно складають: 0,194; 0,502 і 0,303.

Таблиця 3.6

Прогноз до 12 точки навантаження $P(r)$

Сил.факт P, кН	P_1	P_2	P_3	Пом.1	Пом.2	Пом.3	Ci	dY(Pi)	dPi
P1	0,468	0,546	0,624	8,256	9,637	10,981	-0,009	-0,175	0,194
P2	0,489	0,571	0,653	21,418	25,115	28,746	-0,017	-0,304	0,502
P3	0,837	0,977	1,117	13,192	15,801	18,512	0,013	0,134	0,303
Разом P123	1,794	2,094	2,394	42,866	50,554	58,238			

Таким чином, можна констатувати, що регресори зміщень від силових факторів у стику по координатах верстата (див. рис. 3.15–3.18) і таблиця коефіцієнтів передачі (див. табл. 3.2) можуть слугувати своєрідним деформаційним паспортом вузла верстата, на основі якого можна розраховувати і прогнозувати його вплив на точність оброблення.

Реалізований принцип машинного моделювання дозволяє зменшити загальні витрати і час на забезпечення технологічної надійності верстата в процесі його експлуатації. Для ідентифікації деформаційних характеристик і процесів, які трапляються, наприклад у часі, достатньо провести випробування верстата виробничим методом (наприклад, точінням ступінчастого валику) з подальшою комп'ютерною обробкою програмою STYK.

Графік залишків на графіках «Похибки параметра якості» можна інтерпретувати як величину зношення стику при нових даних про загальну похибку розміру, яку можна виміряти через деякий час роботи верстата. Це ілюструється графіком на рис. 3.29, де показані результати з протоколу моделювання при сумарній похибці $Y = Y + \Delta Y$, де ΔY – зношення у стику моделювався нормальним розподілом з параметрами $N(3; 0,5)$. У табл. 3.7

наведені результати цього моделювання. При цьому середнє зношення у стику склав 2,63 мкм (порівняльного з вузлом без зношення 0,087 мкм).

Даний результат має велике значення, оскільки це дає можливість діагностувати зношення вузла та інші процеси малої швидкості без його розбирання.

Таблиця 3.7

Результати моделювання при зношенні у стику, який заданий нормальним розподілом з параметрами $N(3; 0,5)$

Ki	y1	y2	y3	y4	y5	y6	Yексп	Yрасч	Yекс-Yрасч
1	0	-0,098	-0,059	-0,079	0	-0,62	2,85	-0,856	3,706
2	0	2,846	0,735	0,455	0	2,818	7,45	6,854	0,596
3	0	5,615	1,648	0,92	0	5,031	15,33	13,214	2,116
4	0	8,094	2,708	1,329	0	6,372	20,51	18,503	2,007
5	0	10,306	3,96	1,72	0	7,232	25,26	23,218	2,042
6	0	12,199	5,393	2,118	0	7,883	29,96	27,593	2,367
7	0	13,751	6,994	2,554	0	8,541	34,89	31,84	3,05
8	0	14,887	8,662	3,044	0	9,319	40,02	35,912	4,108
9	0	15,605	10,338	3,628	0	10,297	43,59	39,868	3,722
Середнє зношення у стику, мкм									2,63

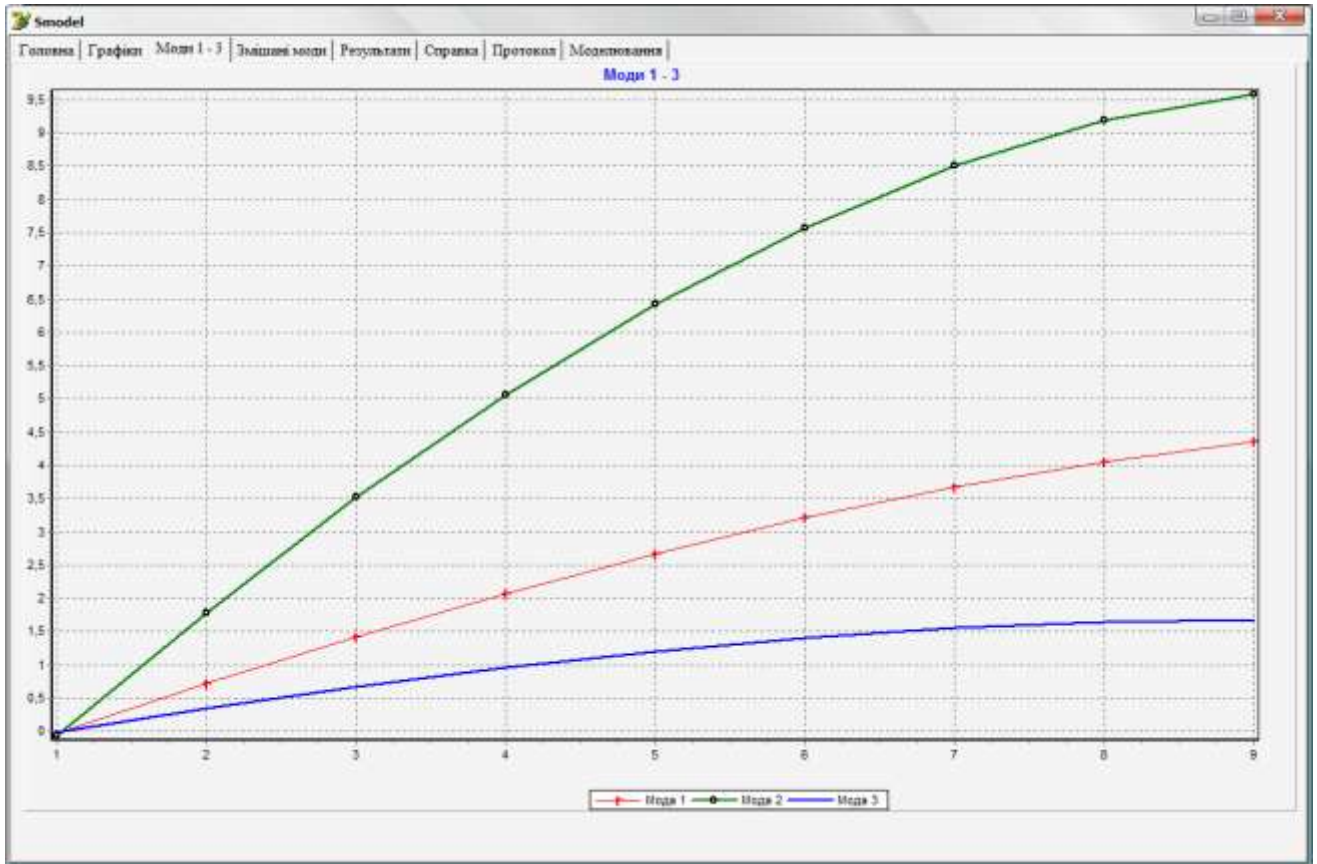


Рис. 3.21. Вкладка «Моди 1-3» програми STUK. Характер зміни кожної складової (моди) деформації при дії силового фактору у стику по координаті X

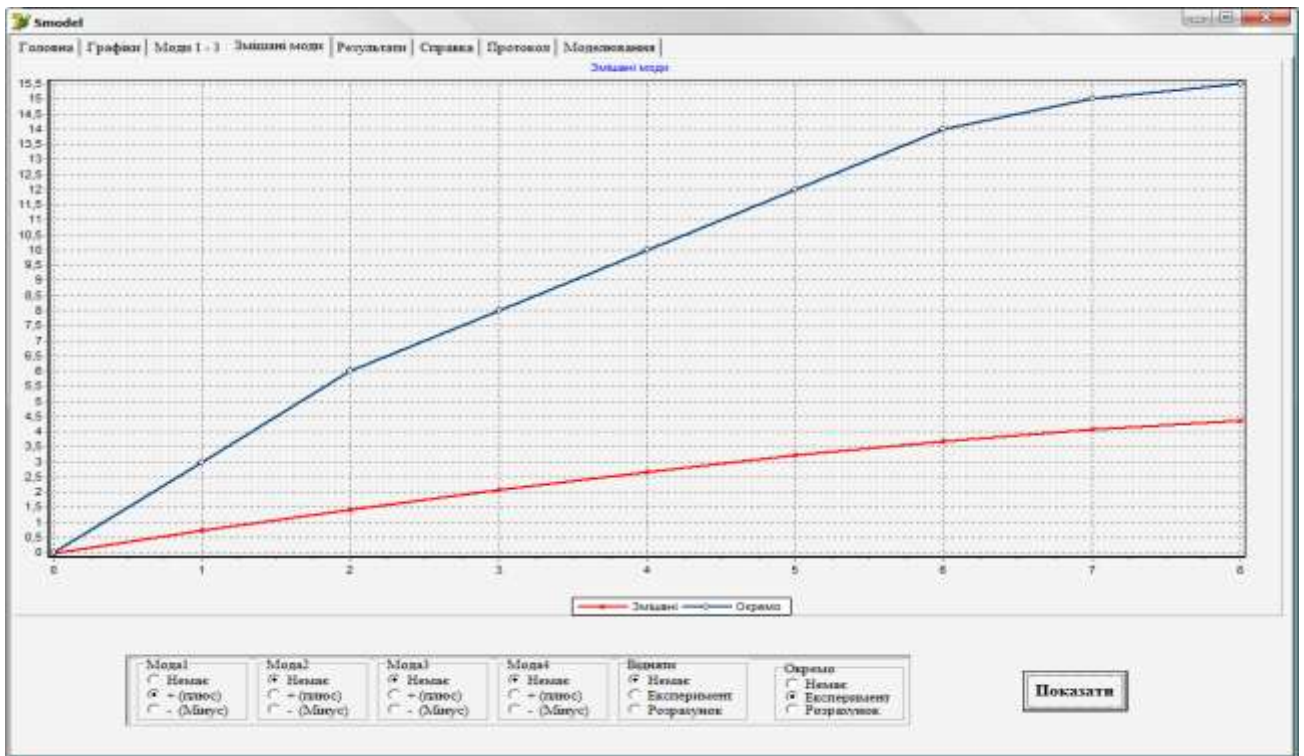


Рис. 3.22. Вкладка «Змішані моди» програми STUK. внесок моди 1 (сила різання P_y) при дії силового фактору у стику по координаті X в загальний баланс деформацій по цій координаті

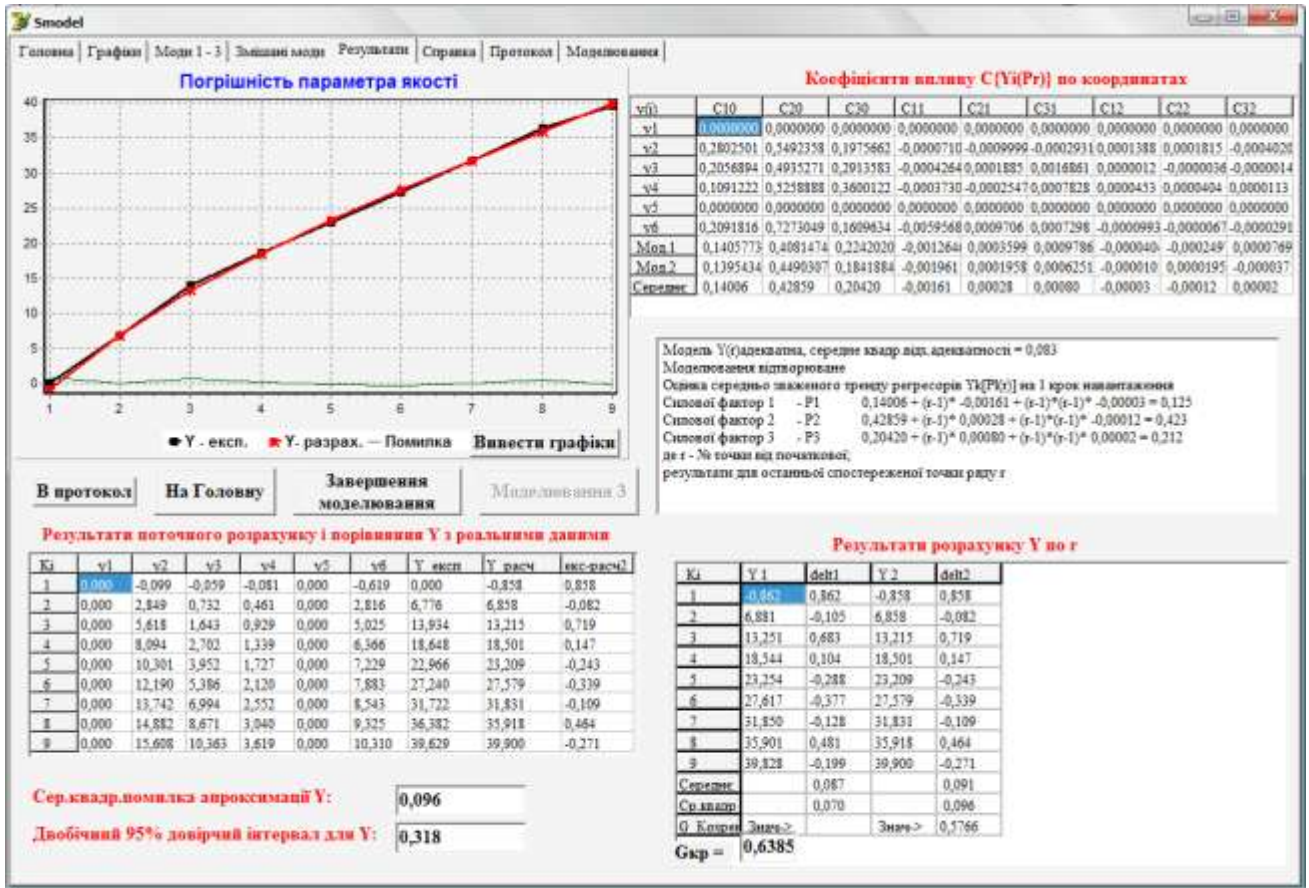


Рис. 3.23. Вкладка «Результати» програми STUK для другої серії моделювання

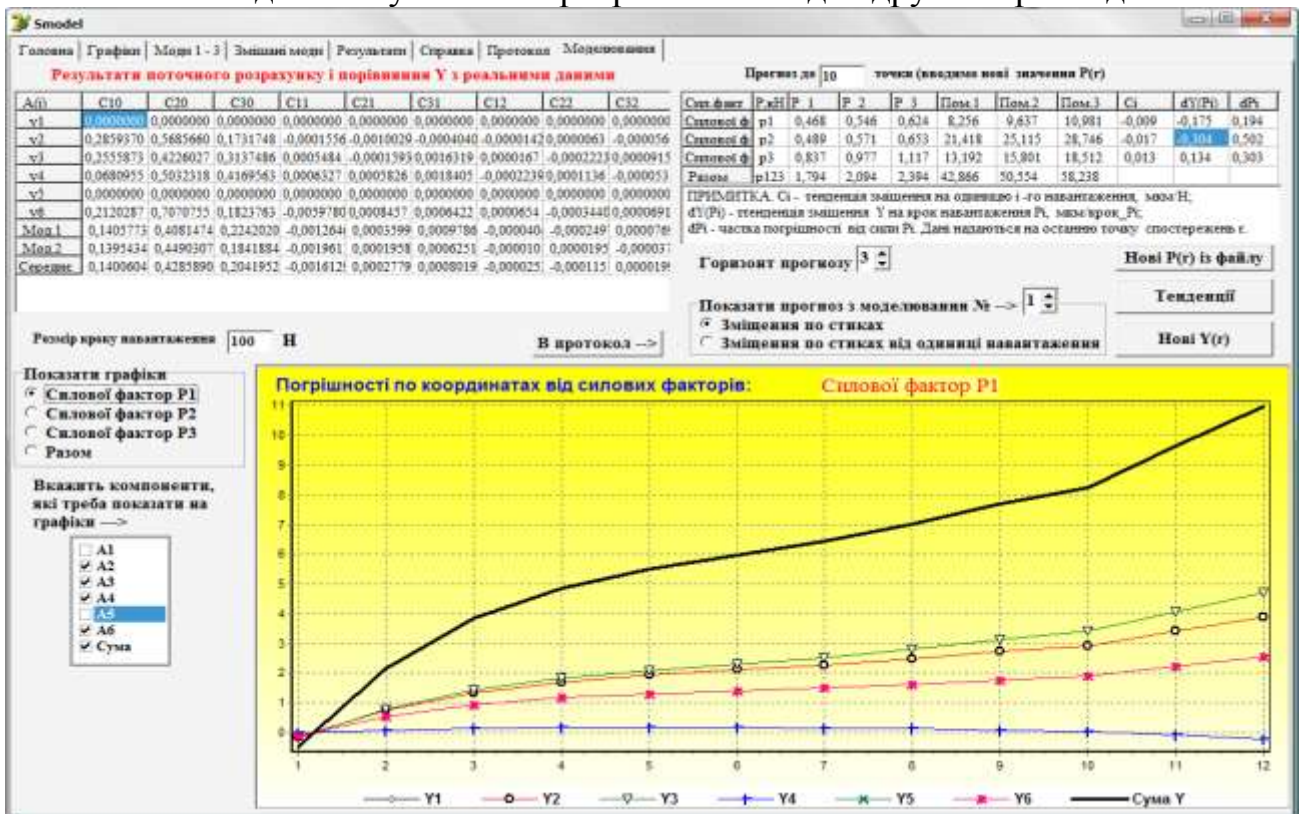


Рис. 3.24. Вкладка «Моделювання» програми STUK з графіками для сили P_x. Експериментальної і модельованої похибки

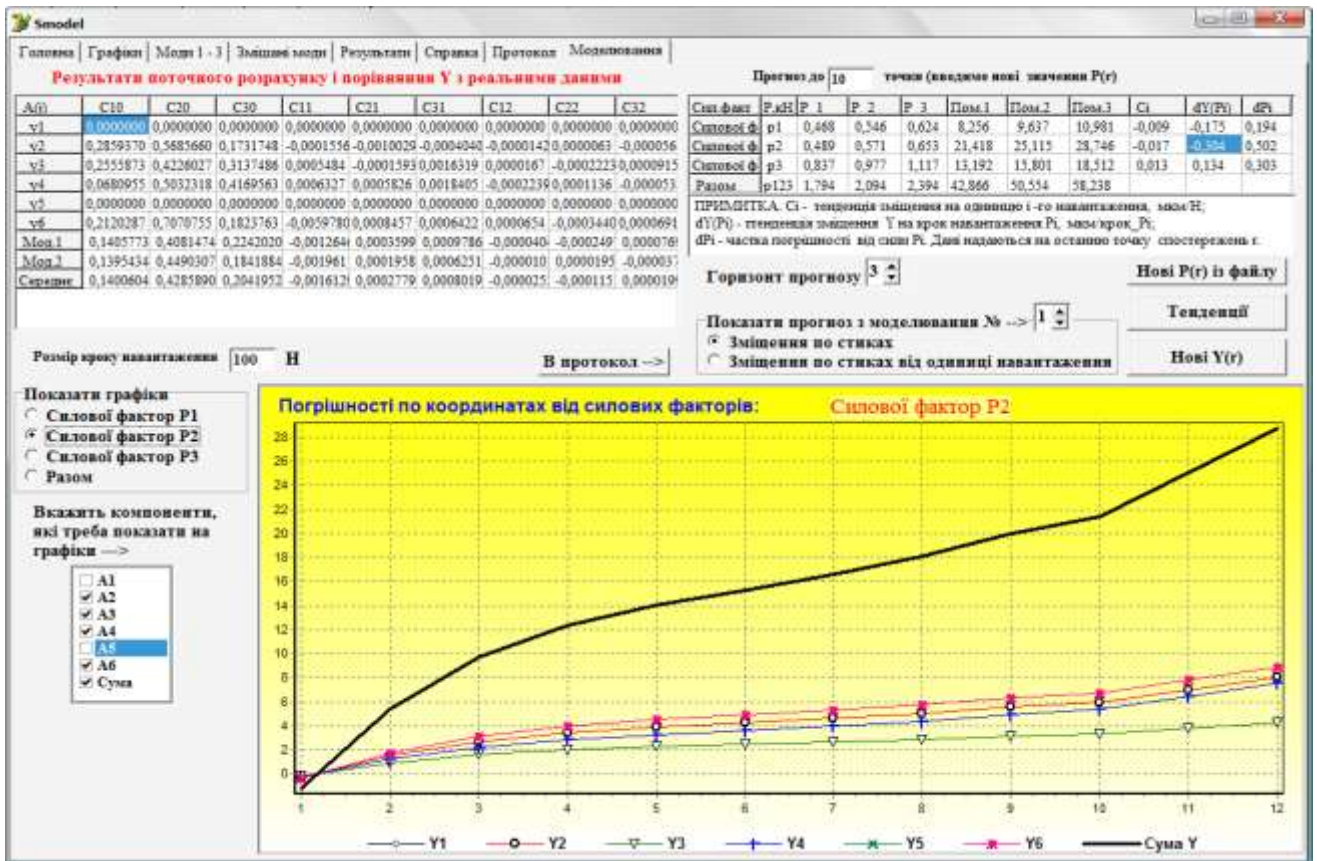


Рис. 3.25. Вкладка «Моделювання» програми STUK з графіками для сили P_2 . Експериментальної і модельованої похибки

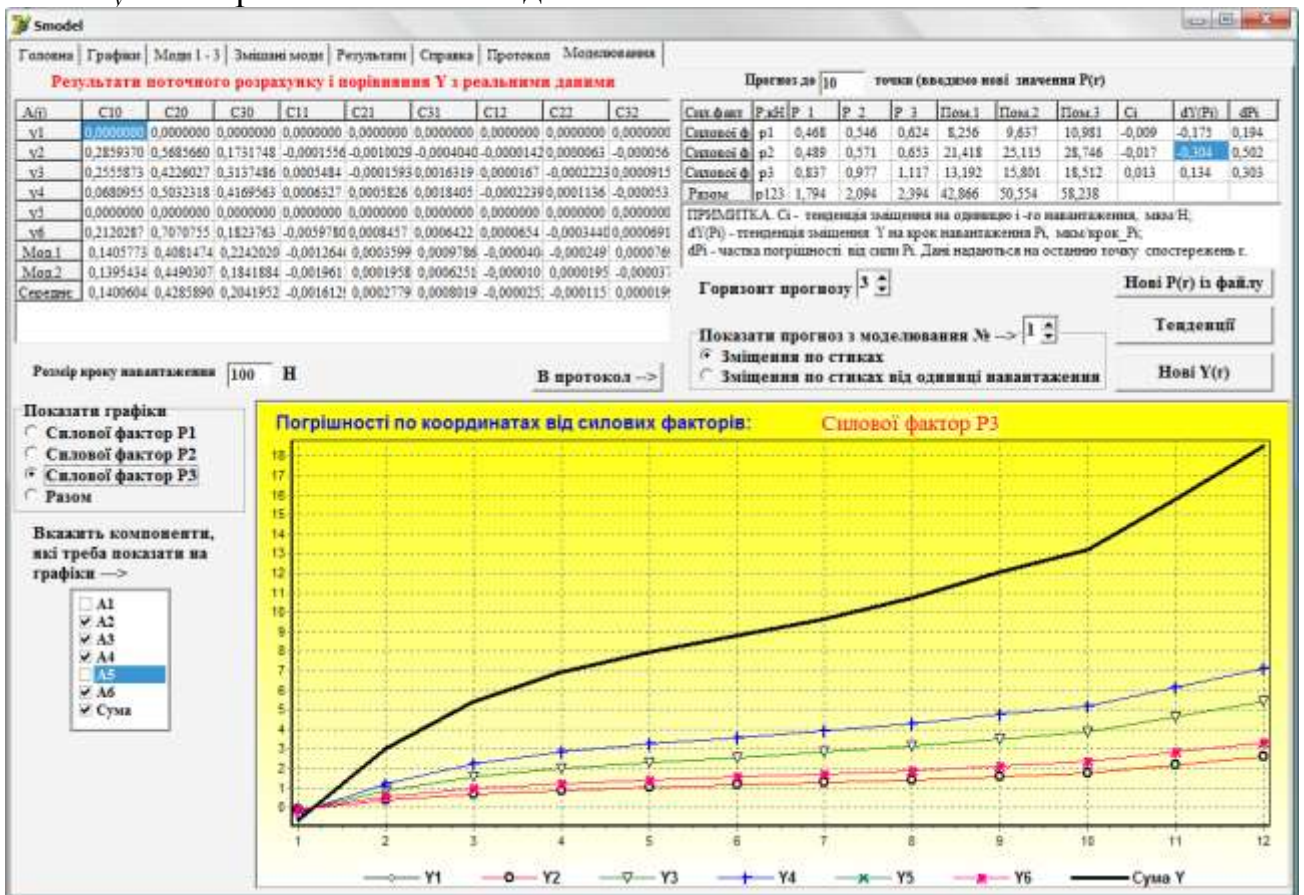


Рис. 3.26. Вкладка «Моделювання» програми STUK з графіками для сили P_3

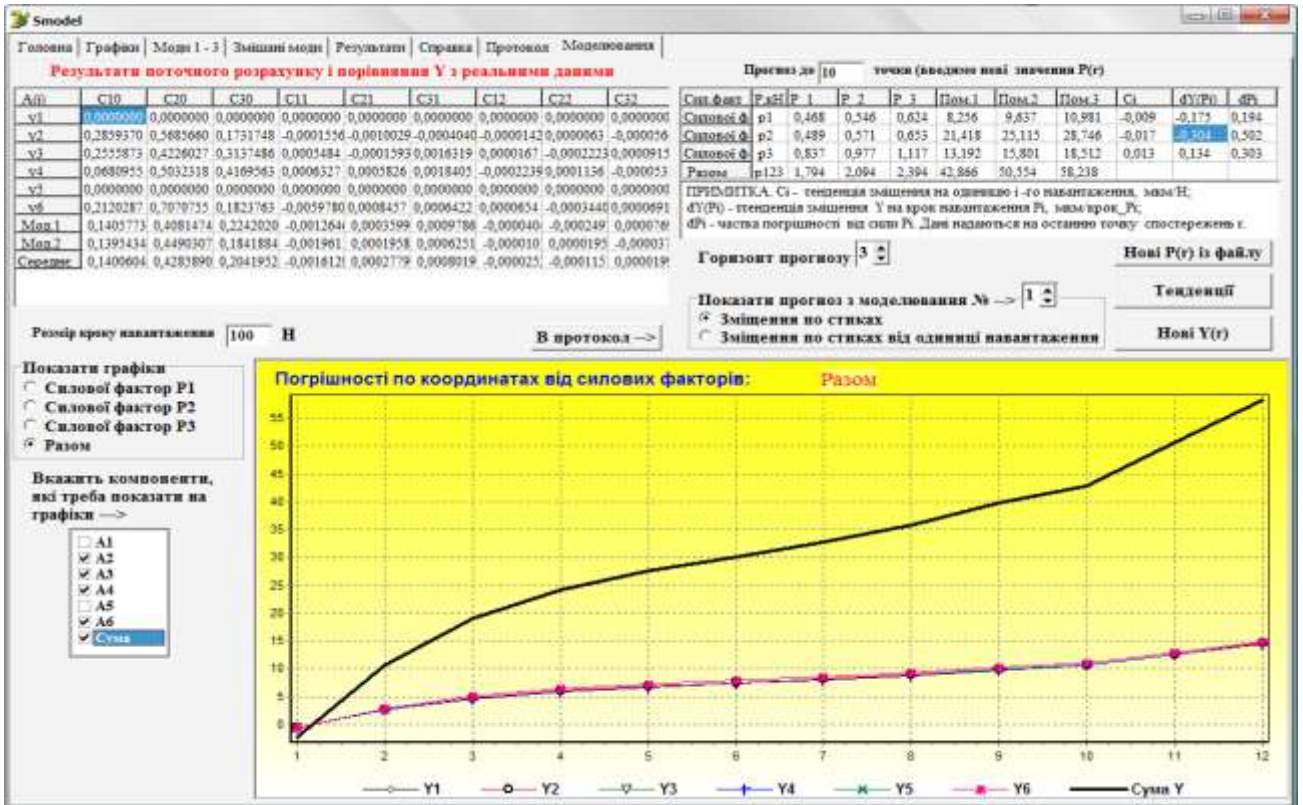


Рис. 3.27. Вкладка «Моделювання» програми STYK з графіками для сумарної дії сил різання

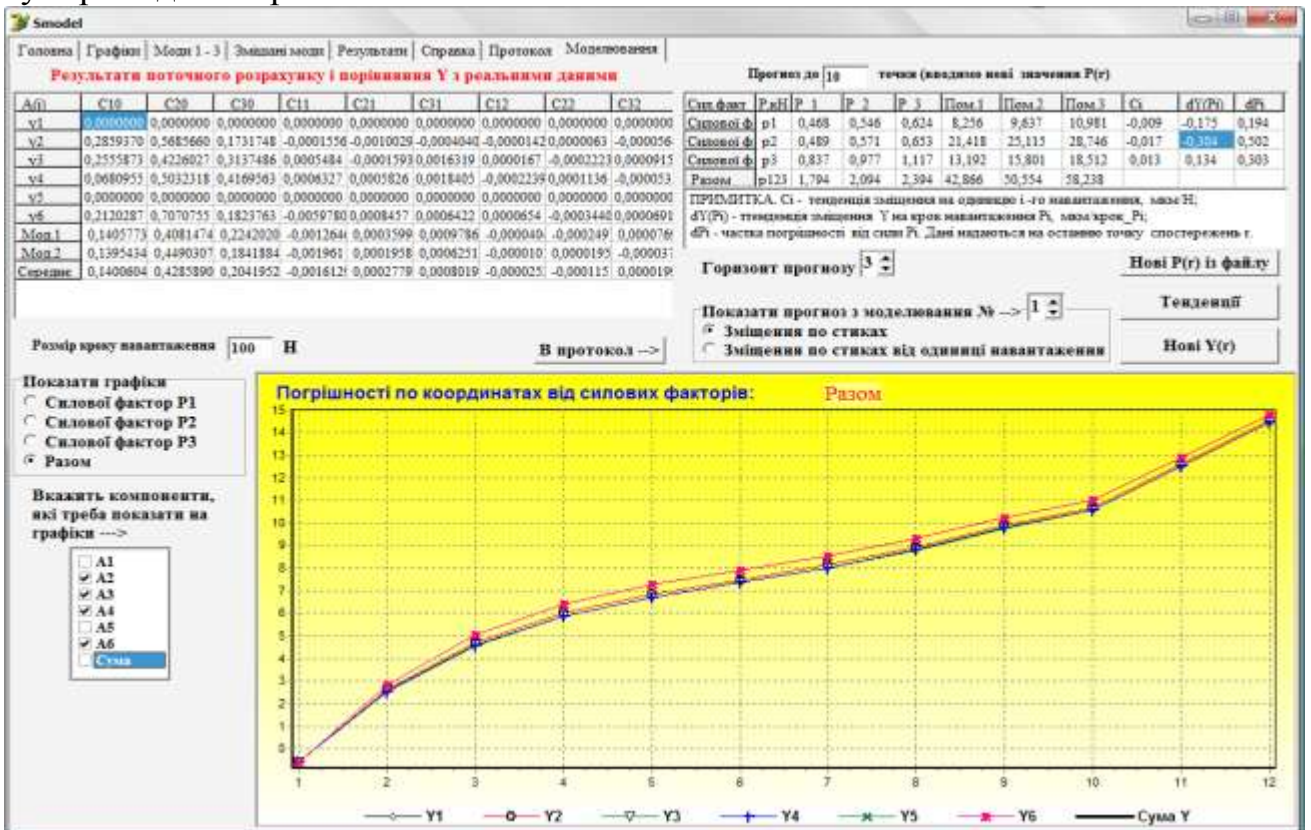


Рис. 3.28. Графіки для сумарної дії сил різання без кривої «Сума»

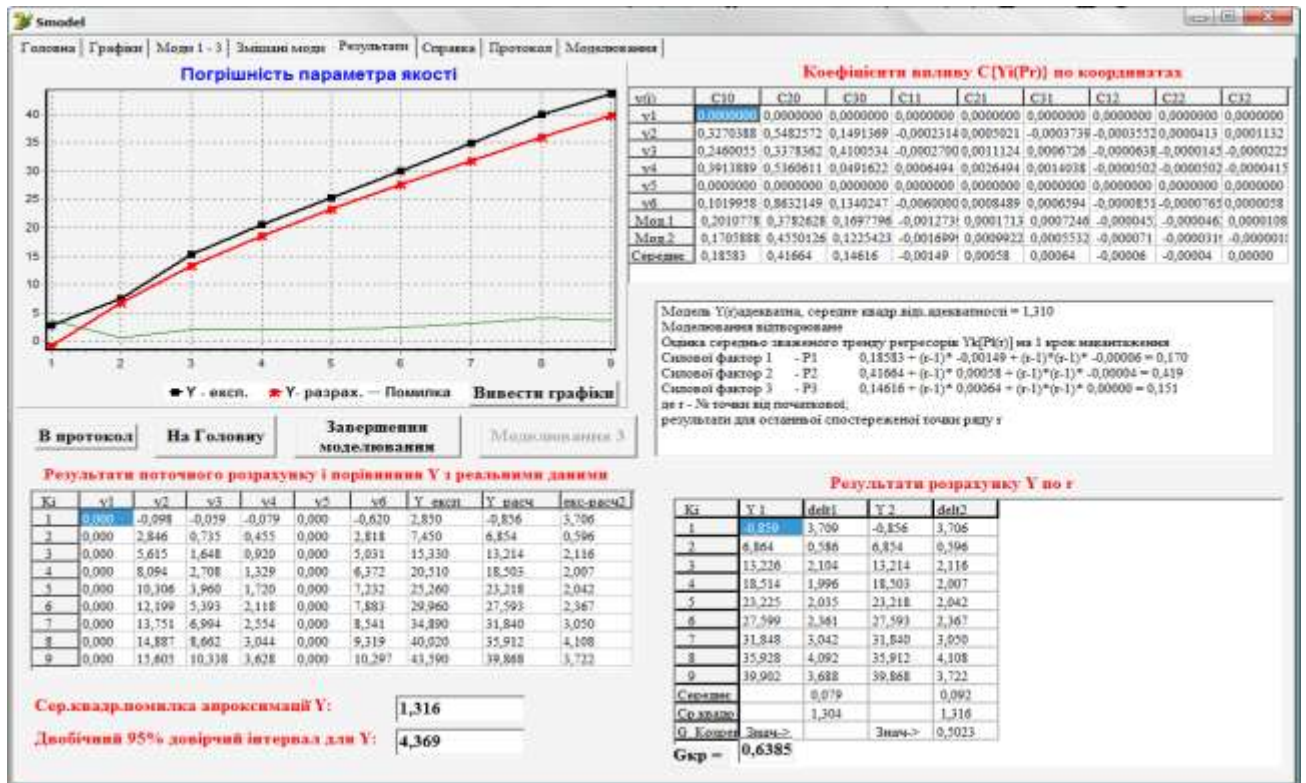


Рис. 3.29. Вкладка «Результати» програми STYK для другої серії моделювання при сумарній похибці $Y = Y + \Delta Y$, де ΔY – зношення у стикі має нормальний розподіл з параметрами $N(3; 0,5)$

3.5. Розрахунково-експериментальна ідентифікація динамічної податливості елементів пружної системи

Метою дослідження є визначення модальних параметрів по кожній із чотирьох перших форм коливань [6]: піддатливості W_i ; величини β_i , що характеризує затухання коливань; власних частот ω_i ; $i = 1, 2, \dots, 4$. В практиці динамічних розрахунків несучих систем верстатів прийнято відокремлювати 3 – 4 перших ортогональних форм коливань [19], що приводить до ортогональної системи рівнянь динаміки. Зазначені параметри можуть визначатися із експериментальної кривої биття контрольної оправки шляхом їхнього підбору з матричного рівняння за методом найменших квадратів:

$$\text{diag } \mathbf{A} \{ \ddot{\mathbf{x}} \} + \text{diag } \mathbf{B} \{ \dot{\mathbf{x}} \} + \text{diag } \mathbf{C} \{ \mathbf{x} \} = \mathbf{F}(t), \quad (3.12)$$

де $|\mathbf{A}|, |\mathbf{B}|, |\mathbf{C}|$ – діагональні матриці відповідно інерції, дисипації і жорсткості розмірності 4×4 (для чотирьох масової системи);

$\{\mathbf{x}\}^T = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ – транспонований вектор модальних переміщень по кожній з j -ій форм коливань, $j = \overline{1, 4}$;

$1(t)$ – одинична функція ;

$\mathbf{F}(t)^T = [T_1[1 - \exp(-\alpha_1 t)]; T_2[1 - \exp(-\alpha t)]; T_3[1 - \exp(-\alpha t)]]$ – вектор інерційних впливів;

T_j – амплітудні значення силових впливів на i -ту парціальну коливальну систему;

$1 - \exp(-\alpha_j t)$ – експонентна залежність з показником α_j , що апроксимує реальний імпульсний силовий вплив на контрольну оправку і визначається експериментально, $\alpha_j = \alpha$ – однаковий для усіх координат.

При цьому вважається, що амплітудне значення T_j імпульсу, що впливає на окрему j -ту парціальну коливальну систему не відомо і визначається розрахунковим аналізом. Матричне рівняння (3.12) розбивається на чотири незалежних лінійних неоднорідних диференціальних рівняння по ортогональних формах коливань:

$$a_j \ddot{x}_j + b_j \dot{x}_j + c_j x_j = T_j [1 - \exp(-\alpha t)], \quad j = \overline{1, 4}. \quad (3.13)$$

Часткове рішення неоднорідного рівняння (3.2) для точки з номером j на часовій осі t шукаємо у вигляді [6]:

$$x_{ij} = \frac{W_i}{1 + \mu_i^2} \left\{ \exp(-\alpha t_j) - \exp(-\beta_i t_j) \left[\cos(\varpi_i t_j) + \mu_i \sin(\varpi_i t_j) \right] \right\}, \quad (3.14)$$

де $\mu_j = \frac{\beta_j - \alpha}{\varpi_j}$; $\beta_i = 0,5b_j/a_j$ – коефіцієнт затухання; $W_j = T_j/a_j$ – модальне зміщення;

c_j – модальна жорсткість; $i = \overline{1, I}$; I – число точок на часовій осі t експериментальній кривій биття контрольної оправки.

Таким чином, для визначення параметрів коливального процесу по кожній координаті необхідно знати 3 параметри: β_i , W_i , ω_i .

Для перевірки роботоздатності запропонованої методики був проведений машинний експеримент, в якому складові ортогональні моди коливань моделювалися згідно (3.14) і з параметрами, які наведені в табл. 3.8. При цьому на кожну із мод був накладений нормальний шум експерименту $N(0; 0,05)$.

Таблиця 3.8

Модальні параметри коливальної системи для машинного експерименту

Мода	β_i	ω_i	W_i	ω_{iD}	μ_i^2
1	105	340	0,95	323,4	-0,868
2	75	440	0,44	433,6	-0,739
3	50	1100	0,47	1099	-0,318
4	25	1000	0,12	999,7	-0,375

Примітка. ω_j – власна частота без врахування затухання β_j ; ω_{jD} – власна частота із врахуванням затухання;

На рис. 3.30 наведений графік затухаючих радіальних коливань контрольної оправки при її імпульсному навантаженні. Час затухання коливань оцінюється величиною $T_3 \approx 30$ мс. Сумарне розрахункове значення ординати графіка визначається з виразу:

$$X_j = \sum_{i=1}^J x_{ij}. \quad (3.15)$$

Позначимо $\Delta_j = \sum_{i=1}^I (X_{ji} - X_{ji}^E)^2$, де X_{ji}^E – експериментальне значення ординати графіка по j -ій координаті (рис. 3.30). Тоді критерієм визначення модальних параметрів може служити мінімум суми квадратів відхилень розрахункових і експериментальних ординат графіків на рис. 3.1 від розрахункових:

$$\min_{\beta_j, \omega_j, W_j} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \Delta_{ji}^2; j = \overline{1,4}; i = \overline{1,101} \quad (3.16)$$

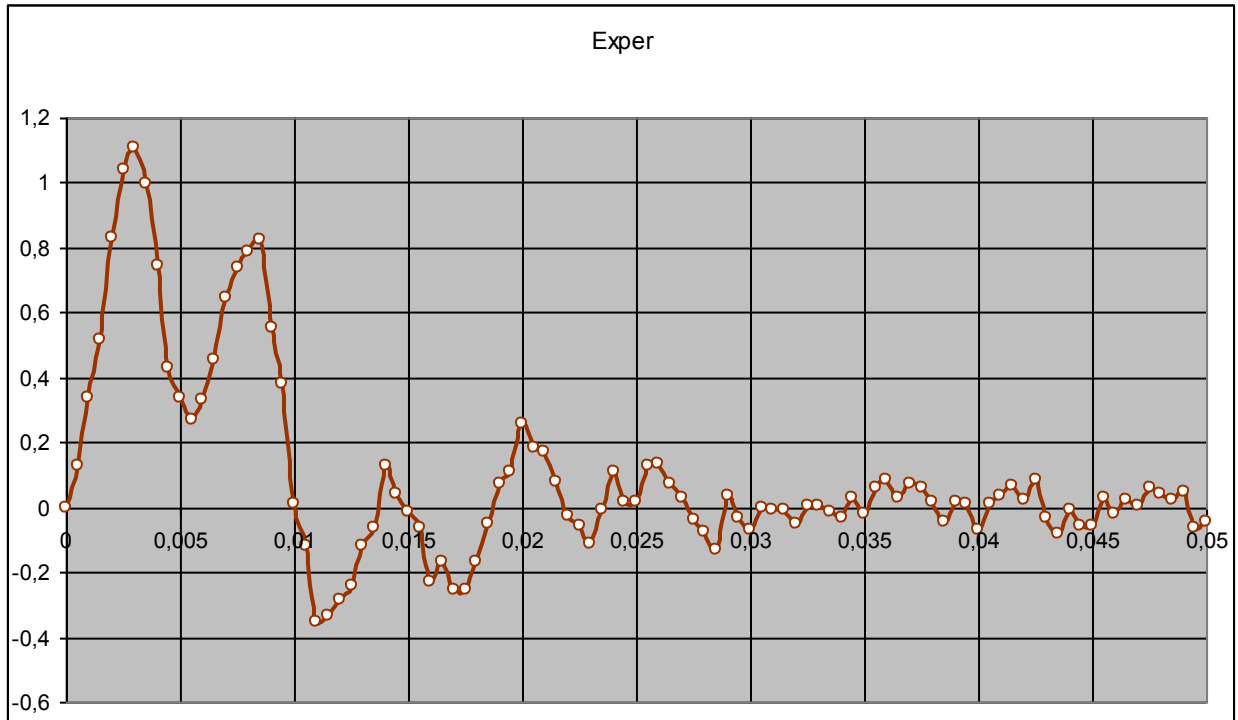


Рис. 3.30. Модельний графік радіальних коливань контрольної оправки

Фіксація коливального процесу виконувалася протягом 50 мс через 0,5 мс, при цьому число точок (див. рис. 3.30) на осі t дорівнює $J=101$. Для чотирьох мод коливань загальне число модальних параметрів дорівнює 12 ($\beta_i, W_i, \omega_i, i=1, 2, \dots, 4$). Ці параметри підбиралися спеціально розробленою програмою ModExp (Додаток В) мінімізації (3.16) модифікованим методом комплексів. Допустимі області для параметрів на початковому етапі обмежувалися значеннями відповідно: $\beta_i = [10; 100] \text{ с}^{-1}$; $\omega_i = [100; 1000] \text{ с}^{-1}$; $W_i = [0; 3] \text{ мкм}$. Алгоритм методу комплексів був модифікований окремо для цієї задачі. Тому що поверхня пошуку дуже складна, початкові модальні параметри підібралися для 20 перших точок графіка (рис. 3.30). Потім область пошуку розширювалася послідовно до 40, 80 и 101 точок. При цьому задавався максимальний розмір комплексу на кінцевому етапі із 200-ох точок. Ця дозволило ефективно використати метод комплексу для даної задачі.

Обчислення проводилися циклами по 60 відображень комплексу з візуальним контролем експериментальної і розрахункової кривої, а також з контролем суми квадратів відхилень по формулі (3.14). При виході параметрів

на граничні значення в ході обчислень припустимі області для них коректувалися.

Метод оптимізації показав гарну збіжність при дуже складній гіперповерхні критерію оптимальності (3.16). Вихідні дані і результати роботи програми ідентифікації ModExp наведені на рис. 3.31 – 3.32 і в табл. 3.9.

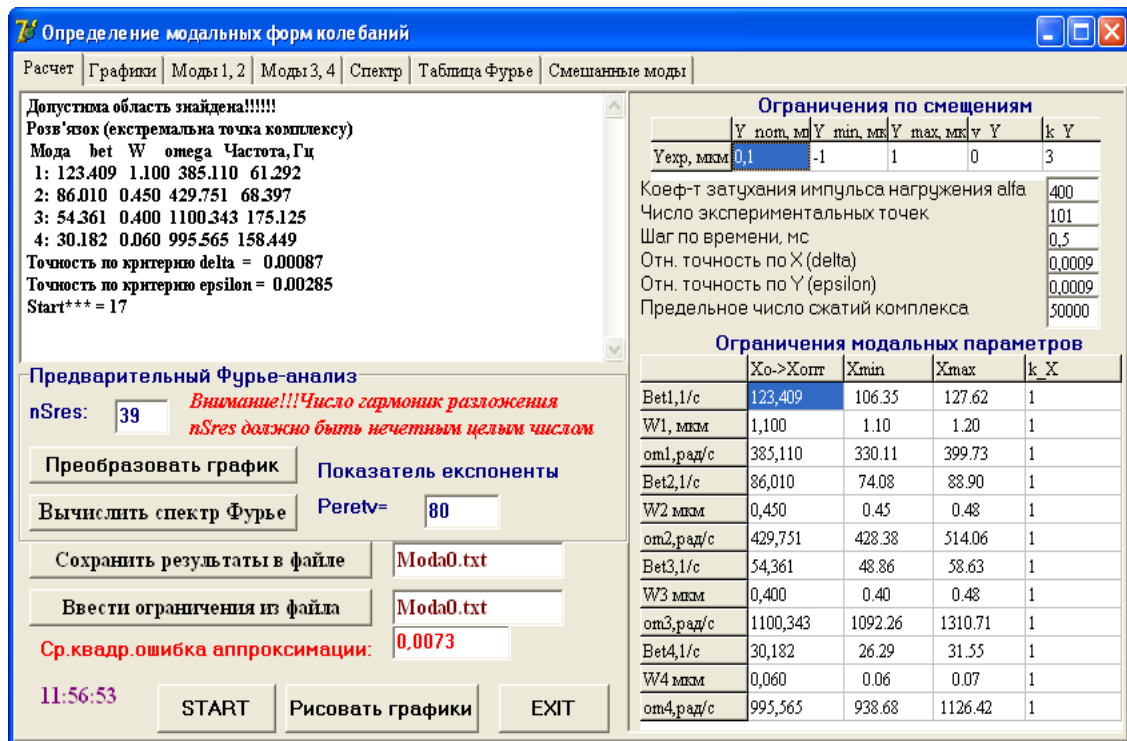


Рис. 3.31. Вихідні дані та результати ідентифікації модальних параметрів ШВ

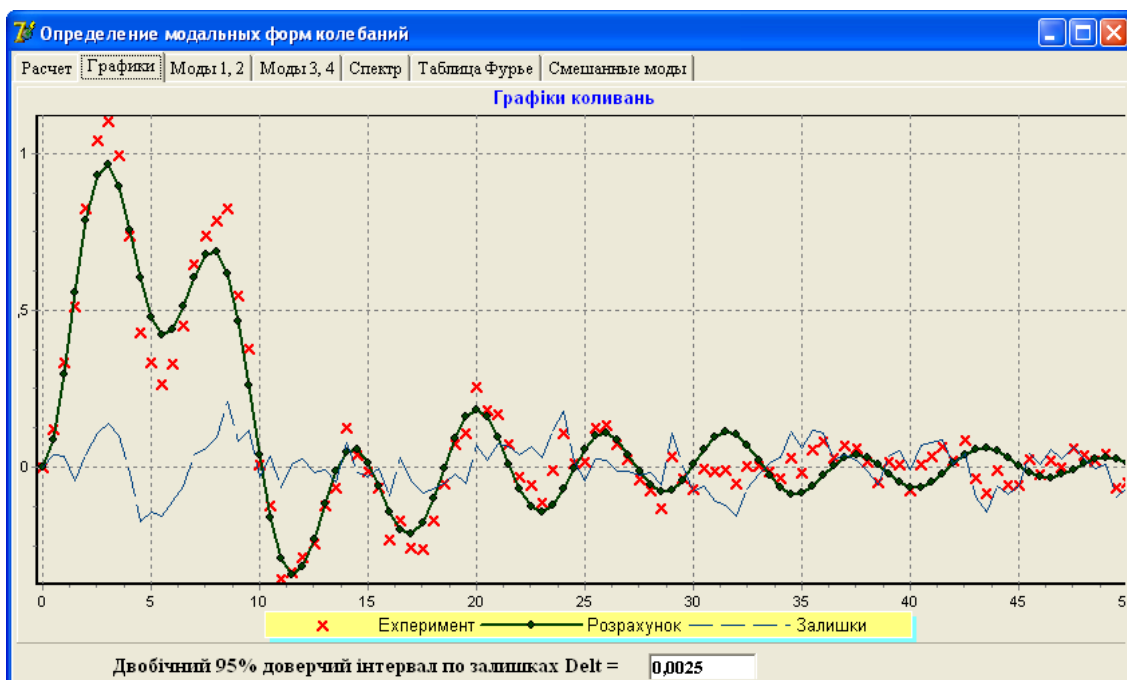


Рис. 3.32. Експериментальна та розрахункова криві коливального процесу

Таблиця 3.9

Модальні параметри коливальної системи

Модальні параметри	Мода i коливань			
	1	2	3	4
$\omega_i, \text{с}^{-1}$	385/340	430/440	1100/1100	996/1000
$\beta_i, \text{с}^{-1}$	123,4/105	86,0/75,0	54,4/50,0	30,2/25,0
$W_i, \text{мкм}$	1,1/0,95	0,45/0,44	0,4/0,47	0,06/0,12

Примітка. В чисельнику – модальні параметри, відновлені програмою ModExp; в знаменнику – модельні значення модальних параметрів.

зміщена оцінка середньоквадратичної похибки апроксимації $\sigma = 0,0073$ мкм, двобічний інтервал 95% по залишках – 0,0025 мкм.

Аналіз результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Збіг експериментальної та розрахункової кривих коливального процесу є дуже гарний.
2. Модальні параметри окремих форм коливань визначаються з досить високою точністю.

3.6. Висновки по розділу 3

1. Отримані моделюванням балансу зміщень токарно-револьверного автомата результати $\Delta d_{\Sigma} = 40$ мкм достатньо точно співпадають з результатами, які отримані в роботі [84], де віджимання каретки у вертикальній площині по вертикальній осі складало за тих же умов $\Delta d_{\Sigma} = 47$ мкм, але, як видно з табл. 3.1, сили різання діють не однозначно на величини деформацій в стику. Тому збіг можна вважати задовільним, але це питання вимагає додаткових досліджень.

2. Обґрунтовано, що регресори і графіки зсувів від силових чинників в стику по координатах верстата можуть служити своєрідним деформаційним паспортом вузла верстата, на основі якого можна розраховувати і прогнозувати його вплив на точність оброблення.

3. Запропонована методика моделюванням балансу зсувів дає можливість діагностувати зношення вузла та інші процеси малої швидкості без його розбирання.

4. Для ідентифікації деформаційних характеристик і процесів, які відбуваються в часі, досить провести випробування верстата виробничим методом (наприклад, точінням ступінчастого валику) з подальшою комп'ютерною обробкою програмою STYK.

5. Розроблені методика і програма розрахунково-експериментальної ідентифікації динамічної податливості елементів пружної системи забезпечують ефективне і точне діагностування динамічної коливальної 4-ох масової системи верстата.

5. Реалізовані принципи машинного моделювання дозволяє зменшити загальні витрати і час на забезпечення технологічної надійності верстата в процесі його експлуатації.

6. Пропоновані методики визначення балансу зсувів елементів пружної системи і розрахунково-експериментальної ідентифікації модальних параметрів забезпечують зручну і надійну ідентифікацію деформаційних властивостей, зношення стиків і динамічних характеристик вузлів верстата.

РОЗДІЛ 4

ВІБРОДІАГНОСТИКА СТИКІВ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА МОД. 16M05A

Шпиндельний вузол являє собою механізм з рухомими стиками, які працюють в області високих швидкостей. Тому для прогнозування роботоздатності найбільш оптимальний є метод вібродіагностики, який був використаний на прикладі токарного верстата мод. 16M05A – патронно-центрового особливо високої точності, призначеного для виконання різних токарних робіт високої точності, що виконуються в центрах, цанзі, патроні і планшайбі, а також для нарізування метричних, дюймових і модульних різей. Верстат має коробку переключення швидкостей шпинделя на підшипниках кочення.

4.1. Розробка моделі діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні

4.1.1. Встановлення зв'язків похибок форми з параметрами шпиндельного вузла.

Похибка форми у поперечному перерізі деталі виражається в параметрах огранки, некруглості і шорсткості. Причинами цих відхилень від ідеальної окружності є відносні вібрації шпинделя з заготовкою та інструменту (різця) із 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 похибок шпиндельної групи є вказані далі (див. п. 4.2.3. і рис. 4.8 – особливості назв елементів пов'язані з вимогами програми VnetMaster побудови і аналізу мереж Байєса) 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 не співвісність його установчих баз (spindle_4). Зовнішні джерела: привід шпинделя (drive_5) і супорт з інструментом (support_6).

На рис. 4.1 схематично показані ці зв'язки.

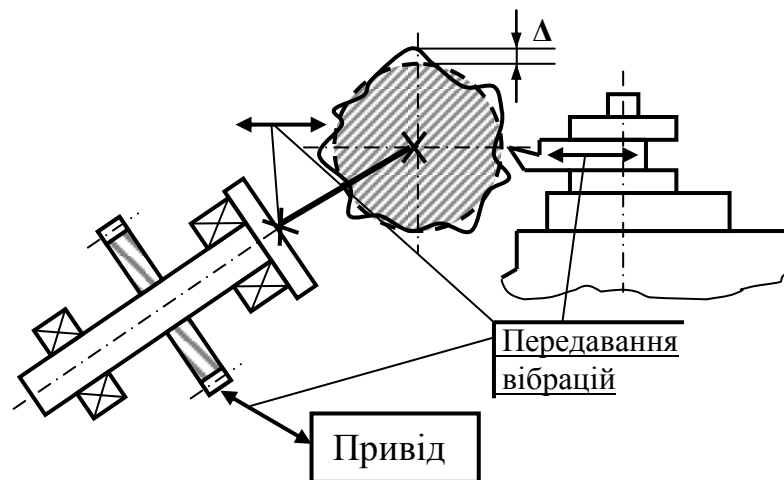


Рис. 4.1. Схема впливу елементів технологічної системи верстата на похибку форми у поперечному перерізі при точінні

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

4.1.2. Встановлення діагностичних ознак похибок форми

При вібродіагностиці основною 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. 4.2. Мікрометр попередньо виставляється на нуль 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 вздовж осі шпинделя. В кожній точці вимірів фіксується показ мікрометра.

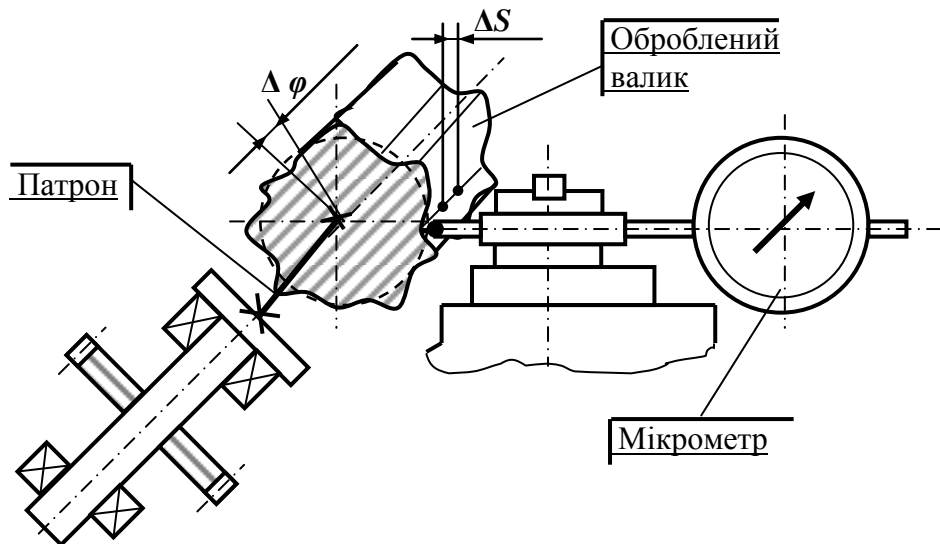


Рис. 4.2. Схема замірів відхилень на верстаті мікрометром

Число точок n на оберт при вимірах дорівнювало $n=12$, тобто $\Delta\varphi=\pi/6=30^\circ$. Крок дорівнює величині подачі на 1 оберт, $\Delta S = S_{\text{об}}$. 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. Цей запис є еталонним зразком, відносно якого буде виконуватися діагностика шпиндельної групи.

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

4.2. Частотний аналіз биття шпинделя і встановлення діагностичних ознак

4.2.1. Методика аналізу

Точність обертання шпинделів, поряд із твердістю, температурною стабільністю і динамічними властивостями шпиндельного вузла, у значній мірі визначає точність і продуктивність верстата в цілому.

Основними джерелами биття шийки шпинделя, що центрує, (биття шпинделя) і биття осі обертання шпинделі є: ексцентриситет поверхні шийки шпинделя і отвору підшипника до вимірювальної поверхні (до шийки шпинделя, що центрує, чи циліндричної поверхні оправки, встановленої в кінчному отворі шпинделя; некруглість і хвилястість поверхні шийки; бічне биття по поверхні шийки; некруглість і хвилястість поверхні підшипника. Величина биття шпинделя визначається спільною дією цих похибок, що виявляються з різними амплітудою, частотою і фазою. Складна взаємодія деталей підшипника під час його обертання і неминуче їхнє проковзування при роботі, дають підставу розглядати биття шпинделя як стаціонарний випадковий процес.

На величину похибки форми (некруглість) і на шорсткість поверхні виробів типу тіл обертання вирішальний вплив, робить сукупний вплив усіх складових биття шпинделя, частота ω яких не дорівнює частоті ω_n обертання шпинделя. Складова биття шпинделя з частотою $\omega = \omega_n$ має визначальне значення для точності обробки виробів на фрезерних і зубошліфувальних верстатах (бабках виробу), а також на верстатах з автоматичною зміною інструмента. Амплітуда складової биття з частотою $\omega = \omega_n$, як правило, дорівнює 80-90% усієї величини биття; тому вона має вирішальне значення при перевірці верстата по таких параметрах, як биття пояски шпинделя, що центрує, биття кінчного отвору шпинделя і т.п.

Між биттям шпинделя і биттям осі обертання шпинделя немає однозначної відповідності. Це зв'язано в першу чергу з тим, що у підшипниках, на яких монтуються шпинделі, немає прямого зв'язку між некруглістю ΔR опорних поверхонь шпинделя й ексцентриситетом e підшипників щодо їхніх отворів.

Виміри, проведені на великій групі шліфувальних верстатів, у тому числі які знаходяться в експлуатації, показали, що кореляційний зв'язок між биттям шпинделя і биттям осі (H) обертання шпинделя відсутнє. Це вказує на необхідність (при оцінці якості шпиндельних вузлів верстатів) роздільного визначення биття H_{cp} шпинделя і биття H осі обертання шпинделя.

Приведена нижче методика частотного аналізу биття шпинделя дозволяє вирішити цю задачу.

Запис биття шпинделя може виконуватися за допомогою контактних чи безконтактних датчиків, з'єднаних підсилювачем і записуючим пристроєм. Отримана крива розбивається на рівні інтервали, число яких кратне числу n оборотів шпинделя, зроблених при записі биття. Сукупність ординат точок поділу являє собою дискретно задану функцію $y(t)$ биття шпинделя, де незалежна перемінна t являє собою час або кут повороту.

Виділення періодичної складової випадкової функції $y(t)$ можна здійснити за допомогою її спектрального розкладання. Одним з методів оцінки спектральної щільності стаціонарного випадкового процесу є безпосереднє застосування перетворення Фур'є до реалізації випадкового процесу. Якщо реалізація $y(t)$ задана на інтервалі часу $(0, T)$, то оцінка спектральної щільності обчислюється по формулі

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

Практично формули для обчислення спектральної щільності по дискретно заданій (числом N крапок) функції $y(t)$ має вид:

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

де

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

Результати обробки запису биття шпинделя верстата, виконаної по формулі (4.2), показані на рис. 4.3. Як видно, поряд з биттям, обумовленим

ексцентриситетом, з частотою ω_n виділена складова биття, яка обумовлена хвилястістю поверхонь підшипника і рівна $0,45\omega_n$, що добре збігається з теоретичним значенням частоти обертання досліджуваного підшипника $\omega_c = 0,44810\omega_n$. Отримані дані вказують також і на те, що точність форми поверхонь підшипника була високою.

Для спрощення аналізу замінимо перетворення Фур'є розкладанням у ряд Фур'є. Це можливо, тому що домінуючі похибки підшипника (овальність, огранювання) виявляються з частотою, кратній частоті ω_n , а швидкість приблизно дорівнює половині швидкості обертання шпинделя. Розкладання в ряд Фур'є для функції $y(t)$ у цьому випадку запишеться:

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

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

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

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

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

(4.5)

4.2.2. Фур'є – аналіз кривої биття

Запис биття шпинделя верстата зроблено в лабораторії металорізальних верстатів кафедри КПВ та ТМ Луцького національного технічного університету. Найбільш прості виміри точності обертання шпинделя, що проводяться при стандартних іспитах верстатів на геометричну точність, зв'язані з оцінкою радіального й осьового биття за допомогою індикатора.

Для виміру биття при робочому обертанні застосовують безконтактні перетворювачі (індуктивні, ємнісні, фотоелектричні та ін.). При цьому вимірювальною базою служить, як правило, точне оправлення (циліндрична чи сферична), яка встановлена в конус шпинделя. При фотоелектричних методах виміру замість оправлення може використовуватися точне сферичне чи циліндричне дзеркало.

Обробка запису биття шпинделя по формулах (4.3) і (4.4) розраховується за допомогою комп'ютера в модулі DPF.pas програмі CORREL, який написаний для дискретного Фур'є перетворення (ДПФ) – в середовищі Borland Delphi 7.

Крім визначення коефіцієнтів розкладання в ряд Фур'є передбачене обчислення ординат y_1, y_2, y_3, y_{1+3} кривих биття і розмахів H_1, H_2, H_3, H биття цих кривих. Криві биття являють собою суми гармонік розкладання кривої биття в ряд Фур'є, складені за наступним правилом. Перша складова биття являє собою суму всіх гармонік з частотами $\omega < \omega_n$; кількісна характеристика цієї складової – розмах H_1 . Ця складова значною мірою визначає шорсткість поверхні оброблюваної деталі. Друга складова – гармоніка з частотою $\omega = \omega_n$; кількісна характеристика – розмах H_2 . Третя складова – сума всіх гармонік, частоти яких $\omega > \omega_n$; кількісна характеристика с розмах H_3 . Ця складова впливає на круглість деталі. Відновлена крива биття осі обертання шпинделя являє собою суму всіх гармонік спектра биття шпинделя, частоти яких $\omega \neq \omega_n$; її ординати $y_1 + y_3 = y - y_2$. Розмах H відновленої кривої биття являє собою узагальнену характеристику точності обертання шпинделя. Розмах H_1 – це узагальнена характеристика впливу похибок комплекту тіл кочення на точність обертання шпинделя. Розмах H_2 являє собою подвоєний приведений ексцентриситет. Розмах H_3 – це узагальнена характеристика впливу похибок форми доріжок кочення на точність обертання шпинделя, оскільки в цій області частоти зсуву осі обертання шпинделя обумовлені переважно обертанням внутрішнього кільця підшипника. Результати аналізу кривої биття по еталону наведені на вкладці «ДПФур'є» інтерфейсу програми CORREL (рис. 4.3).

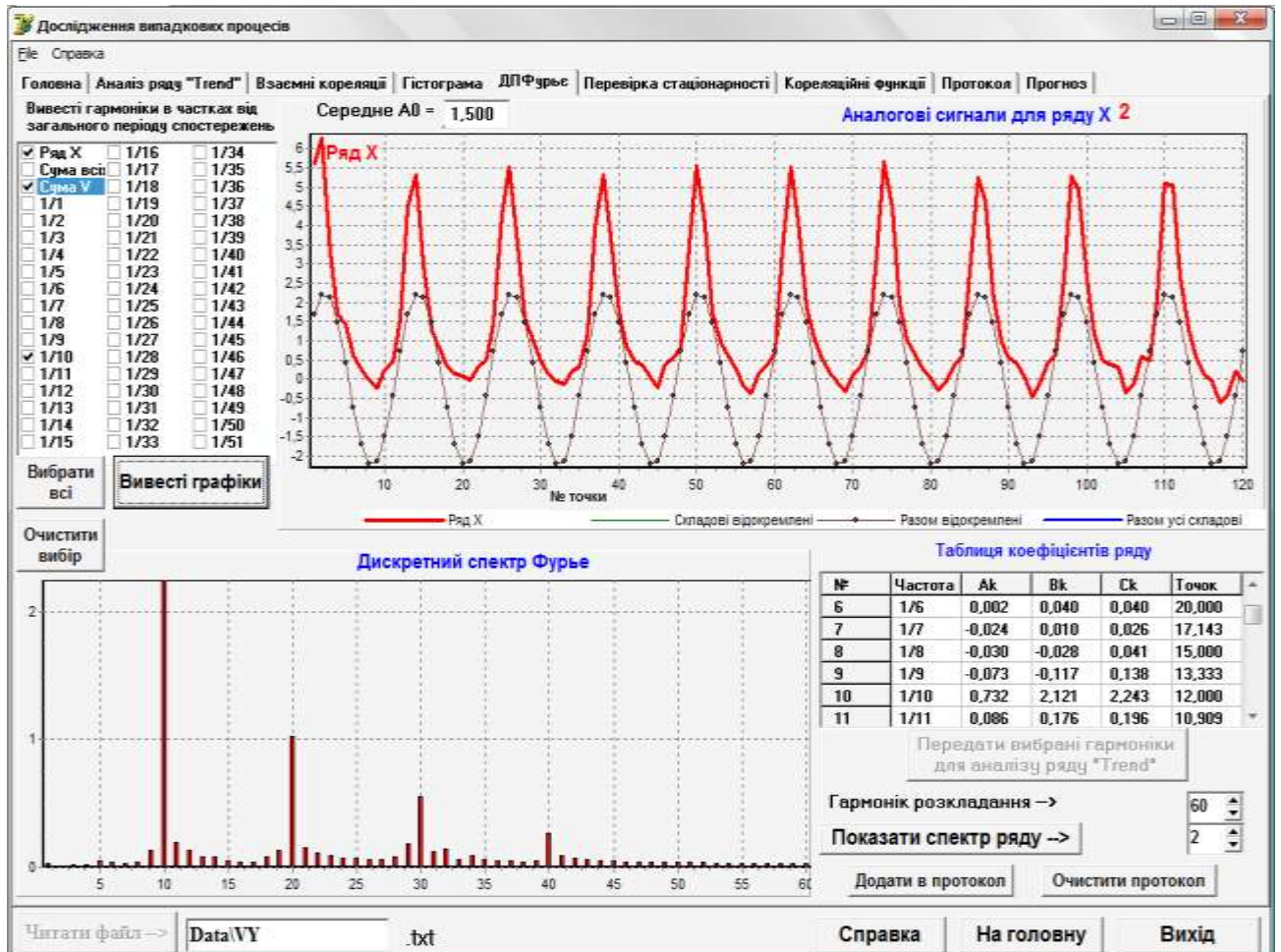


Рис. 4.3. Вкладка «ДПФур'є» програми CORREL; експериментальний ряд y_k биття і розмах H_2 (подвоєний приведенй ексцентриситет) коливань з частотою ω_n одного оберту

Експериментальний ряд $y(k)$ биття (розмах H) і розмах H_2 коливань з частотою ω_n одного оберту. Коливання з частотою ω_n відбуваються з амплітудою $A = 2,24$ мкм і характеризують чисте биття шпинделя. Це можна бачити в таблиці коефіцієнтів ряду для гармоніки №10, період якої – 12 точок. Бачимо також з графіку «Дискретний спектр Фур'є», 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 $\omega_n/4$. Це низькочастотні складові визначають при обробленні поверхні деталі відповідно: ексцентричність ($A=2,243$ мкм), еліпсність ($A = 1,029$ мкм), огранку 3 ($A = 0,5$ мкм) і огранку 4 ($A=0,25$ мкм).

Сумарний вплив цих складових наведений на рис 4.4. Бачимо, що ці коливання практично співпадають з розмахом $H-A0$.

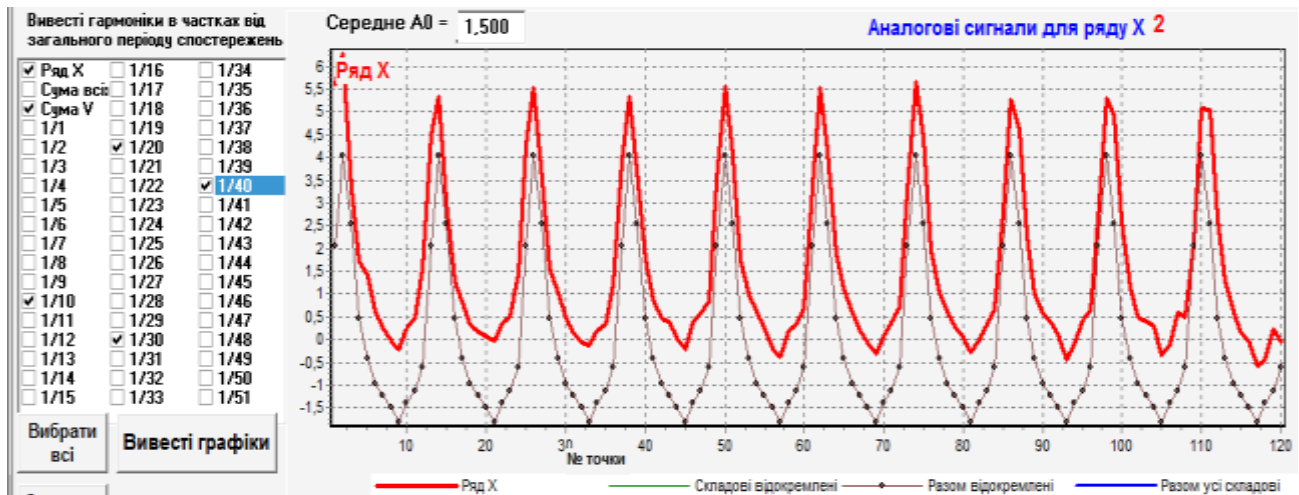


Рис 4.4. Сумарний вплив складових з частотами ω_n , $2\omega_n$, $3\omega_n$ і $4\omega_n$

Вплив доріжок і тіл кочення (частоти $\omega_i < \omega_n$, розмах H_3) наведений на рис. 4.5, сумарне значення цього розмаху складає приблизно $H_3 = 0,6 \dots 0,7$ мкм. Форму цієї кривої надано на нижньому графіку рис. 4.5.

Сума всіх гармонік з частотами $\omega_i > \omega_n$ – розмах H_1 наведено на рис. 4.6, сумарне значення цього розмаху складає приблизно $H_1 = 4,5$ мкм. Ця складова значною мірою визначає шорсткість поверхні оброблюваної деталі.

Розмах H відновленої кривої биття $\omega_i \neq \omega_n$ наданий на рис. 4.7 і являє собою узагальнену характеристику точності обертання шпинделя, $H = 4,8$ мкм.

Проведений дискретний Фур'є – аналіз кривої биття шпинделя дозволяє приблизно діагностувати по частотах якість збирання ШВ і вплив окремих елементів технологічної системи на точність і якість обробки при повздовжньому точінні. Результуючі параметри цього аналізу надані у табличній формі (табл. 4.1).

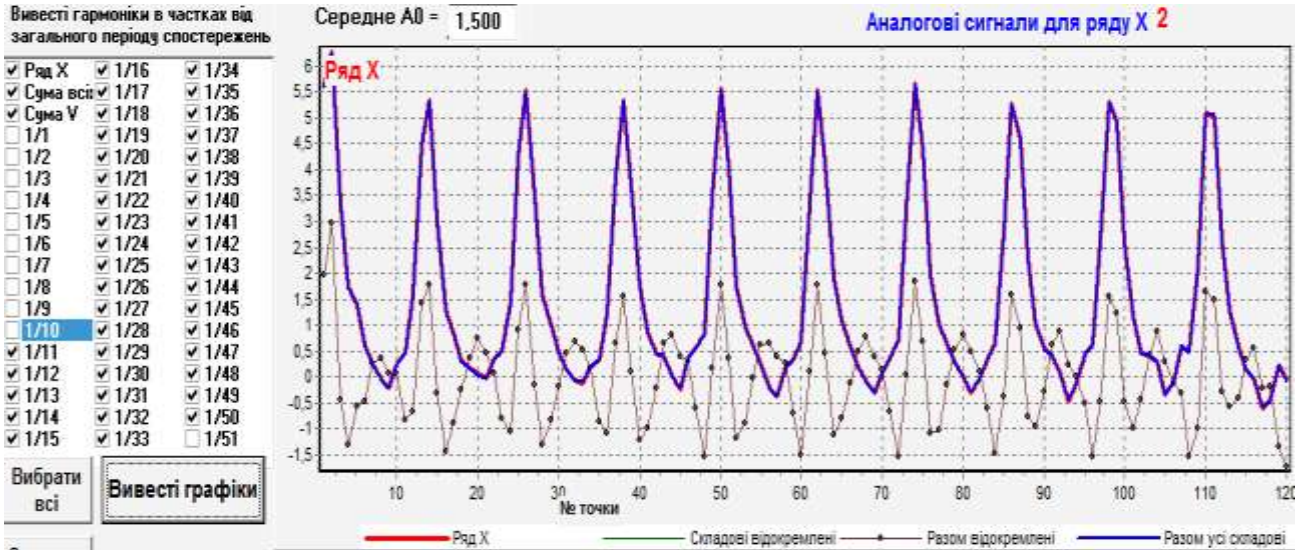


Рис. 4.5. Вплив доріжок і тіл кочення (частоти $\omega_i < \omega_n$, розмах H_3)

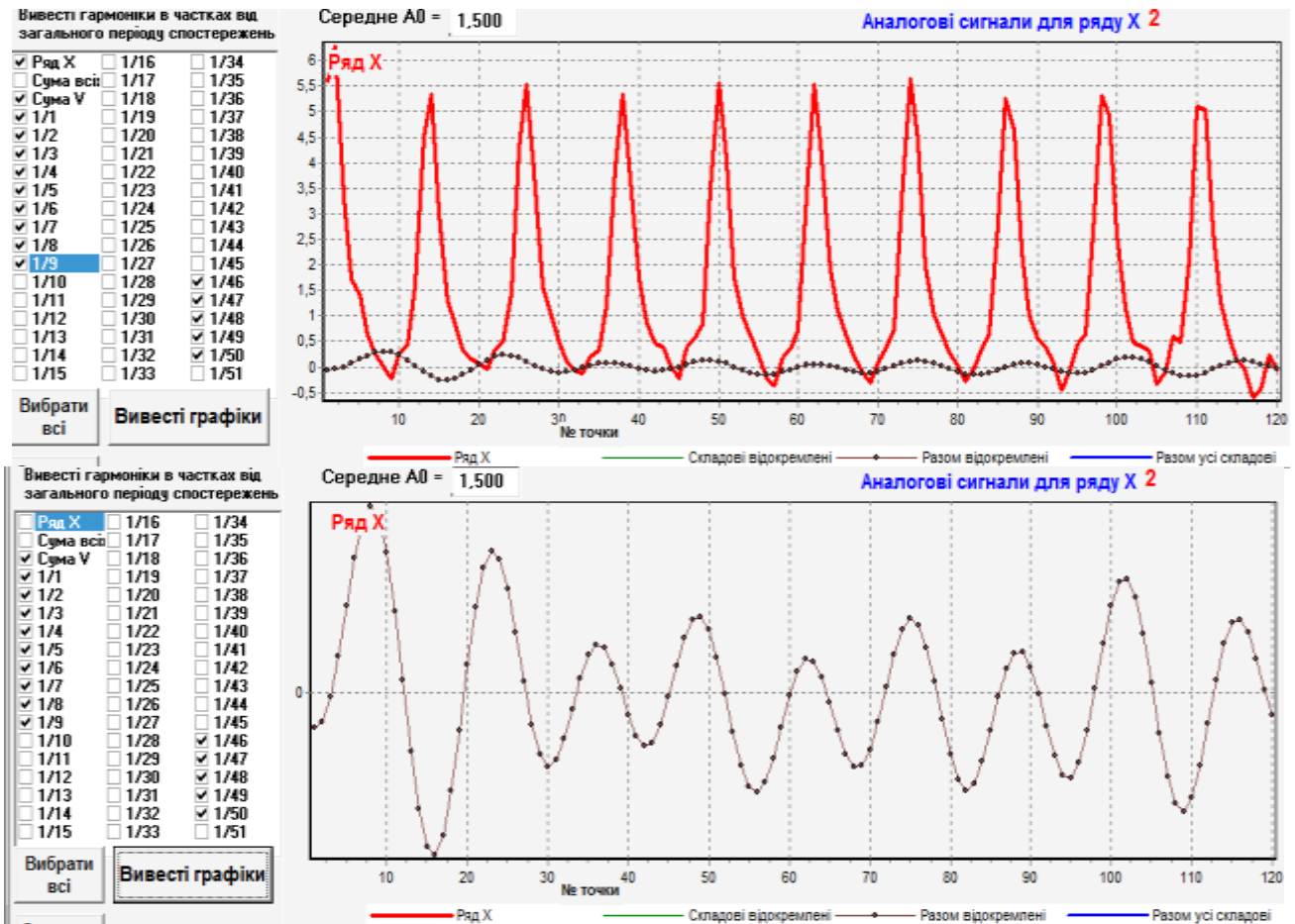


Рис. 4.6. Сума всіх гармонік з частотами $\omega_i > \omega_n$ – розмах H_1

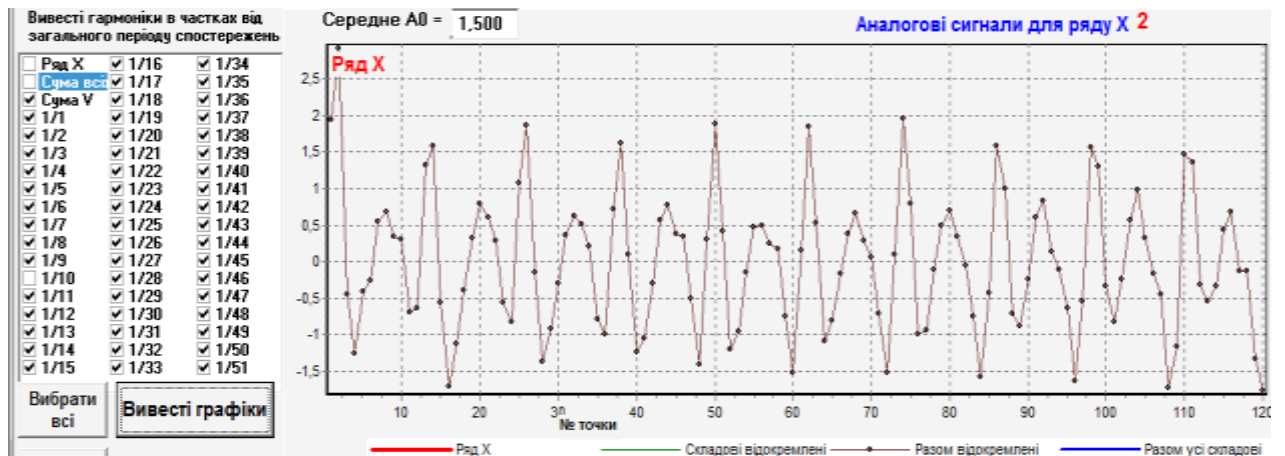


Рис. 4.7. Розмах H відновленої кривої биття $\omega_i \neq \omega_n$

4.2.3. Встановлення зв'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 параметри частотного аналізу кривої y_k биття шпинделя

№	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 неспіввісності осі шпинделя і заготовки
3	Розмах H_1	Score_H1	$\omega_i > \omega_n$	4,5	Шорсткість і хвилястість: тіла кочення, привід, доріжки кочення
4	Розмах H_2	Score_H2	$\omega_i = \omega_n$	2,24	Биття: неспіввісність 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. 4.8.

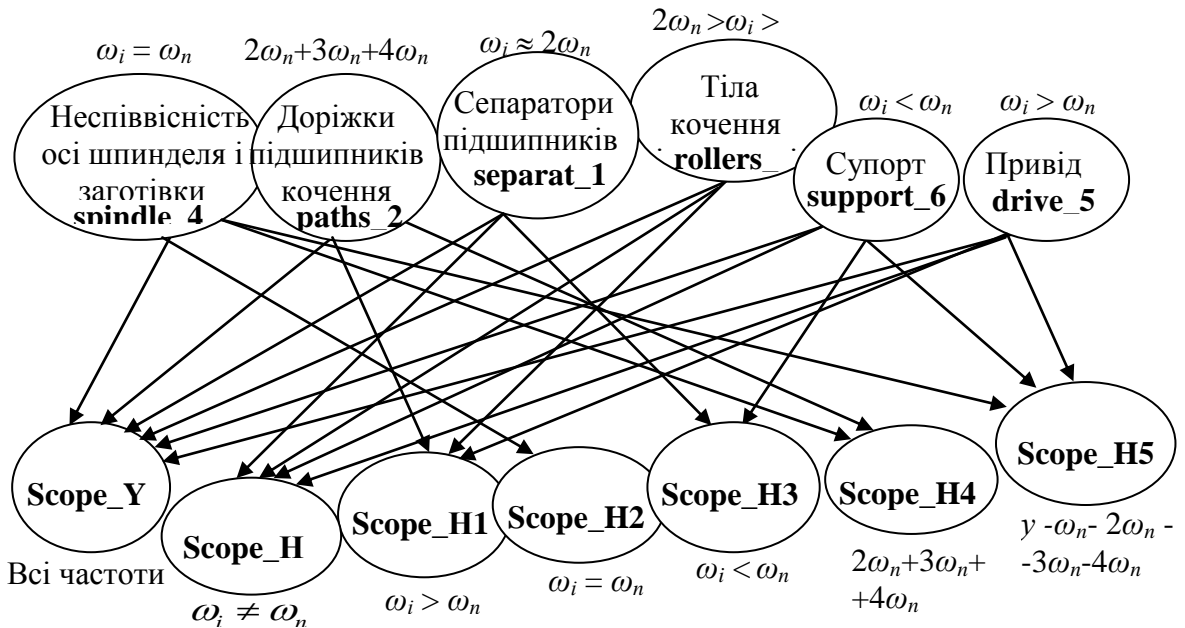


Рис. 4.8. Схема зв'язків по частотах можливих джерел (діагнозів) з діагностичними ознаками (симптомами)

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.

Таблиця. 4.2

Матриця 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
Scope_Y	1	1	1	1	1	1
Scope_H	1	0	1	0	1	1
Scope_H1	0	1	1	0	1	0
Scope_H2	0	0	0	1	0	0
Scope_H3	1	0	0	0	0	1
Scope_H4	0	1	0	1	0	0
Scope_H5	0	0	0	1	1	1

4.3. Навчання мережі Байєса для діагностики шпindelьної групи

Як можна бачити з попереднього аналізу (див. п. 4.2.3, рис. 4.8), 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 похибками 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.

4.3.1. 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 шпindelьної групи. Тобто мережу можна буде все ж таки навчити ціною значних зусиль, але до того 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. 4.3). Дискретний спектр Фур'є цього коливального процесу будемо рахувати еталонним.

Потім з врахуванням встановлених зв'язків (див. табл. 4.2 і рис. 4.8) на еталонну криву биття накладаємо збурення по амплітудах відповідно відокремлених розмахів (див. рис. 4.8) з імітацією шуму експерименту.

Для реалізації цієї методики, тобто генерації і навчання БМ, був дописаний додатковий модуль NetV.pas програми CORREL в середовищі Borland Delphi 7 (Додаток Г). Вкладка «Навчання мережі Байєса» програми CORREL показана на рис. 4.9.

The screenshot shows the 'Bayesian Network Training' (Навчання мережі Байєса) tab in the CORREL software. The interface is divided into several sections:

- Control Panels:**
 - Left panel: Parameters for amplitude and phase, such as 'Запас zR по розмахам, %' (20), 'Запас zA по амплітудах, %' (20), 'Зона ризику, %' (15), and 'Чутливість по амплітудах, мм' (0.05).
 - Top center: 'Шум експерименту' (Experimental noise) with 'Середнє A' (0.0) and 'Ср. квадрат. відхилення S' (0.1).
 - Right center: 'Вибір частот генерації для...' (Frequency selection) with radio buttons for H, H1, H2, H3, H4, and H5.
- Data Tables:**
 - 'Поточні дані по розмахам коливань' (Current data by oscillation ranges) table with columns: Розмах, Score Y, Score H, Score H1, Score H2, Score H3, Score H4, Score H5. Rows: Максимум (0.92, 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), Опадет (7.00, 4.33, 3.92, 4.61, 0.02, 3.45, 1.43).
 - 'Поточні дані по амплітудах коливань' (Current data by oscillation amplitudes) table with columns: Large, separat 1, path 2, rollers 3, Spindle 4, Drive 5, Support 6. Rows: Максимум (0.222, 0.782, 0.037, 2.712, 0.090, 0.050), Еталон (0.220, 0.651, 0.031, 2.260, 0.002, 0.041), Кортеж № (0.060, 0.152, 0.026, 0.105, 0.090, 0.061).
- Training Table:** 'Таблиця навчання мережі' (Network training table) with columns: Кортеж, separat 1, path 2, rollers 3, Spindle 4, Drive 5, Support 6, Score Y, Score H, Score H1, Score H2, Score H3, Score H4, Score H5. It contains 26 rows of training data with status indicators like 'Well', 'Badly', 'Alarm', 'Badly'.

Рис. 4.9. Вкладка «Навчання мережі Байєса» програми CORREL

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

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

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

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

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

Налаштування dA «Перевищення амплітуд від еталону при генерації, %» слугує для встановлення рівня амплітудних збурень. При цьому по кожній генерованій амплітуді дається приріст $\Delta A_i = A_i \cdot (dA/2 + A_{ic})$, де – 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 завантажуються текстовий файл з даними за вказаним шляхом (в нашому випадку Data\VY.txt). При цьому робиться активною вкладка «Навчання мережі Байєса».

Далі встановлюються налаштування програми, які згруповані у вікнах вкладки у верхньому лівому куту. Налаштування, 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 налаштуванні «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 налаштуванні «Вибір частот генерації для:», якщо скинутий прапорець з «Автоматична генерація», а число циклів генерацій встановлено 1;

2) цикл для обраного діапазону розмахів в налаштуванні «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 автоматичний перехід на вкладку «ДПФур'є», 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 назначати каталог «..\BaesNet», але це не принципово.

Збережений файл слугує вихідними даними для роботи програми VNetMaster побудови й аналізу мереж Байєса, роботу з якою описано в [15, 100].

4.3.2. Побудова й аналіз мережі для діагностування шпindelної групи верстата

Для генерації таблиці навчання було обрано режими: «Автоматична генерація», число циклів генерацій 10. Інші налаштування прийняті за замовчуванням (див. рис. 4.9). Генерована таблиця наведена в Додатку Д.

По генерованій таблиці програмою VNetMaster була побудована оптимальна структура БМ (рис. 4.10). Протокол генерації матриці навчання БМ наведений в Додатку.

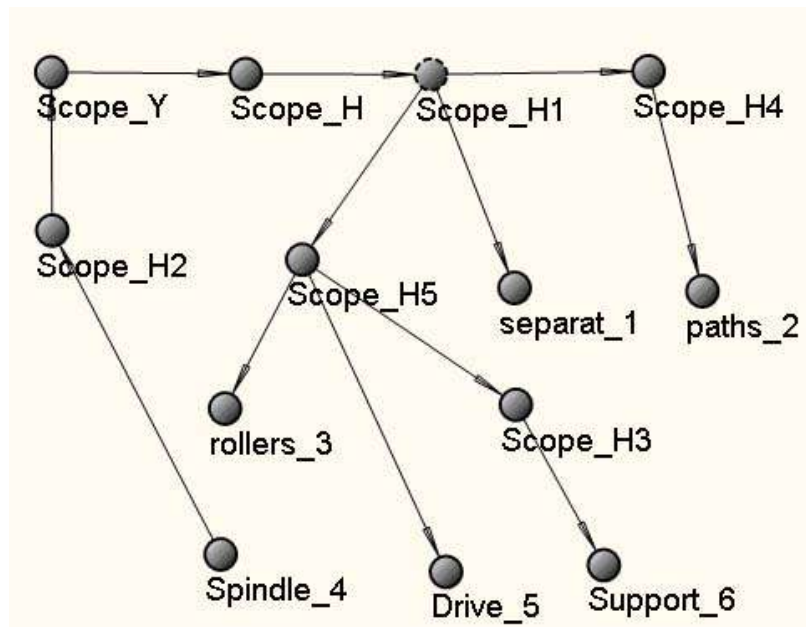


Рис. 4.10 Побудована оптимальна структура БМ діагностування шпindelної групи верстата

Структура мережі будується, 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. 4.2.3, рис. 4.8 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. 4.8.

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

4.3.3. Діагностика дефектів шпindelної групи з використанням розробленої мережі Байєса

4.3.3.1. 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. 4.11).

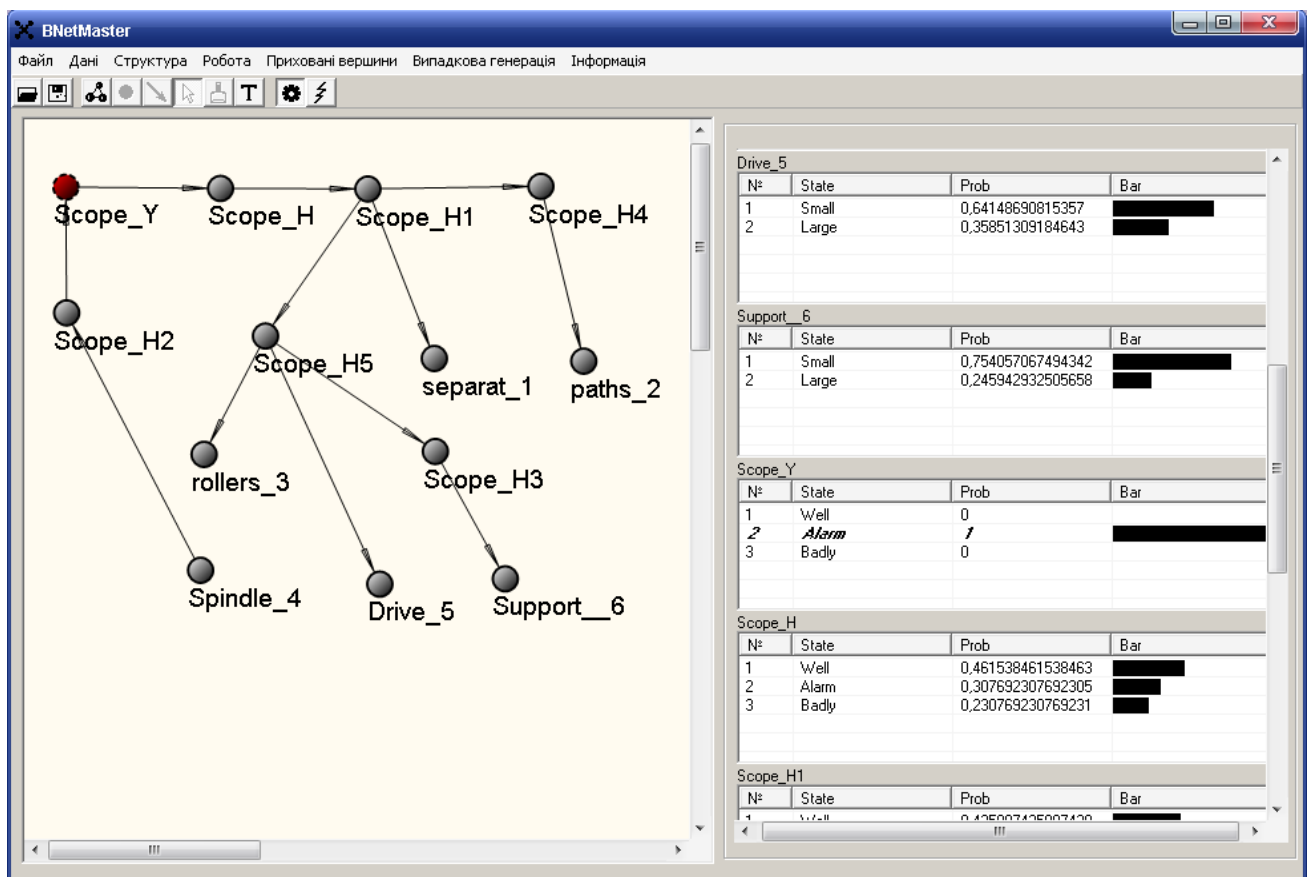


Рис. 4.11. Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованій Score_Y з $p_{Alarm} = 1$

Розраховані значення таблиці умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ наведені в таблиці табл. 4.3 і на рис. 4.12, 4.13.

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	

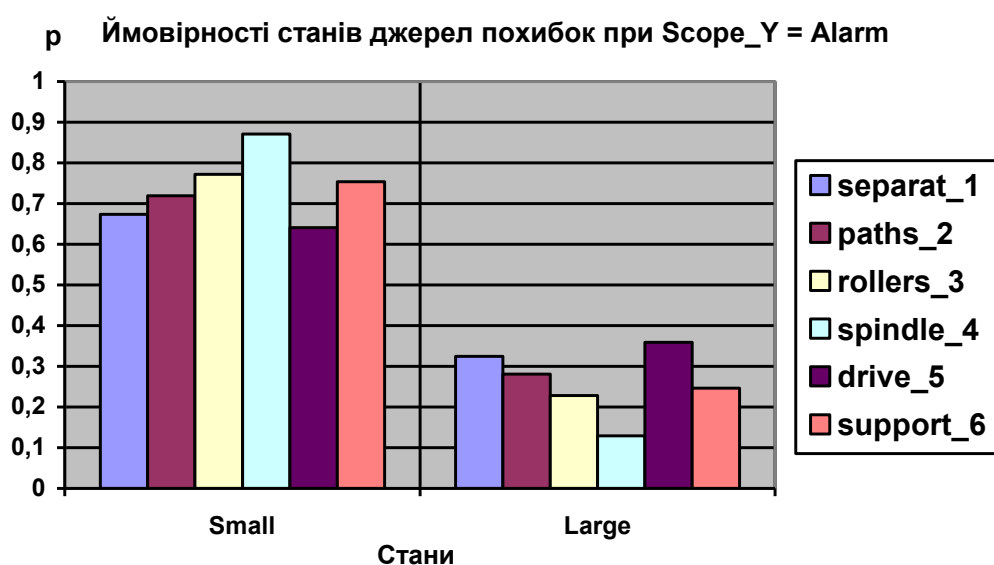


Рис. 4.12. Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку небезпечного загального рівню коливань $Score_Y = \text{«Alarm»}$

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 $p_{Large}=0,359$.

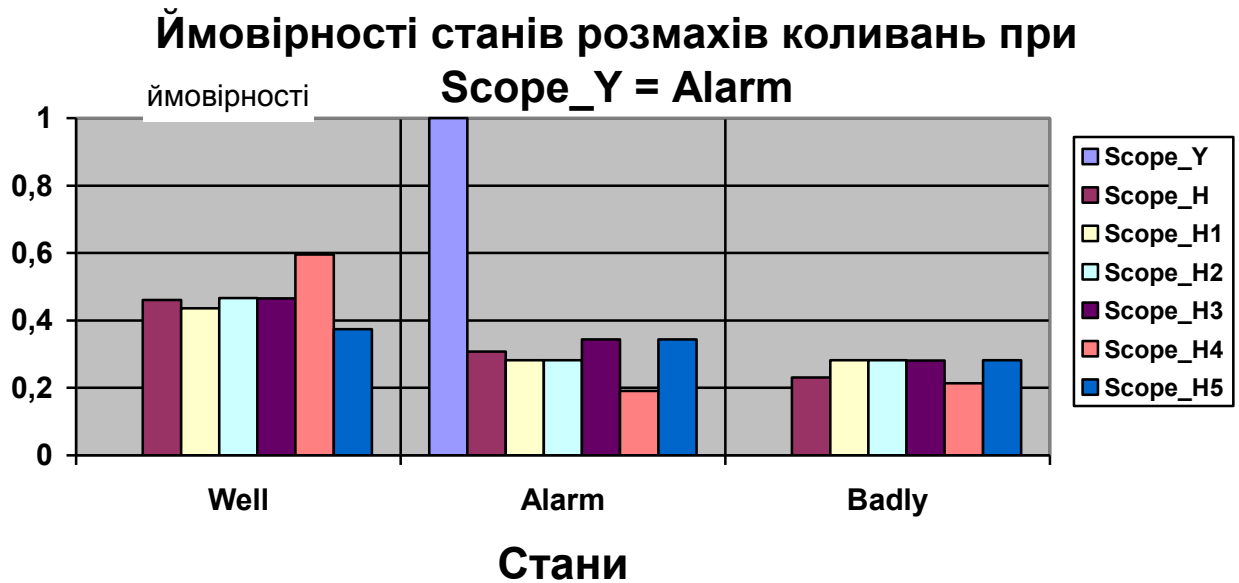


Рис. 4.13. Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку небезпечного загального рівню коливань Score_Y = «Alarm»

4.3.3.2. Діагностика при небезпечному загальному рівні коливань Score_Y і Score_H1

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. 4.14). Це означає, що зафіксовано небезпечні рівні загального розмаху коливань у і розмаху коливань Н1 з частотами $\omega_i > \omega_n$ (шорсткість і хвилястість).

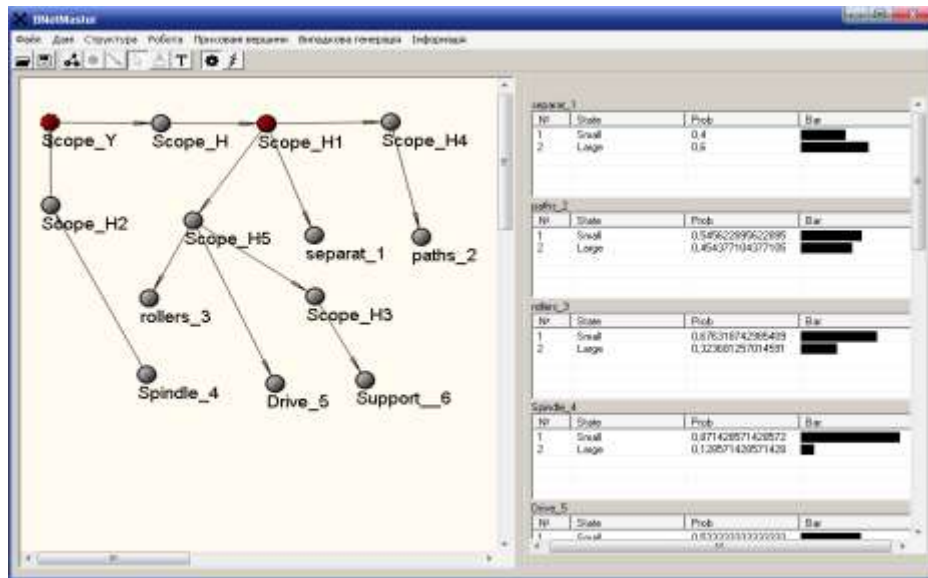


Рис. 4.14. Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованих $Score_Y$ і $Score_H1$ з $p_{Alarm} = 1$

Розраховані значення умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ наведені в таблиці табл. 4.4 і на рис. 4.15, 4.16.

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	

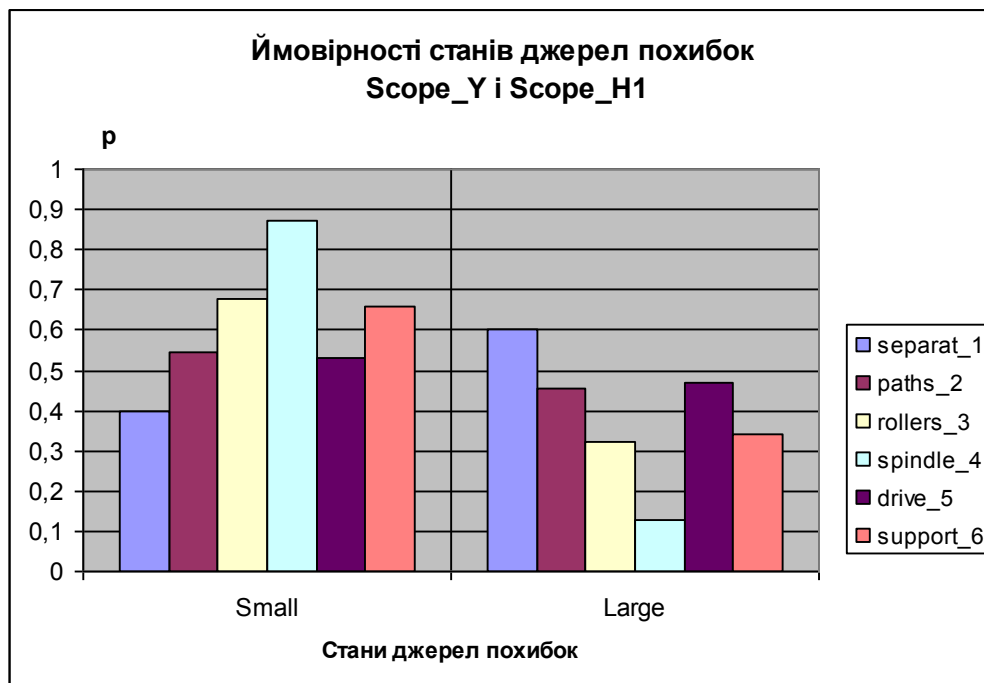


Рис. 4.15. Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку небезпечного загального рівню коливань Score_Y = «Alarm» і Score_H1 = «Alarm»

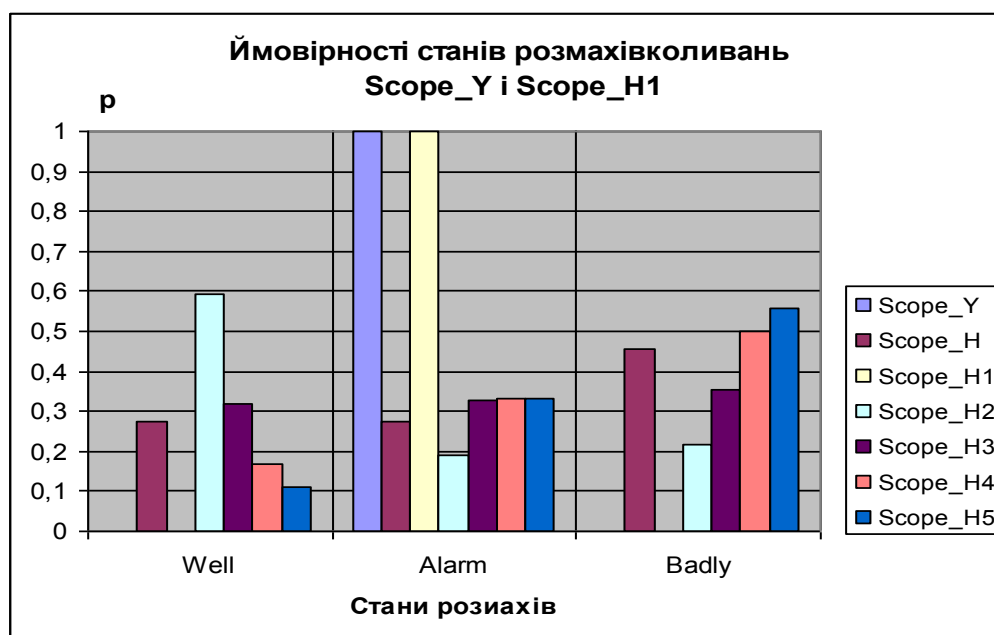


Рис. 4.16. Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку небезпечного загального рівню коливань Score_Y = «Alarm» і Score_H1 = «Alarm»

4.3.3.3. Діагностика при перевищенні допустимого рівню коливань 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. 4.17). Це означає, що зафіксовано небезпечний рівень розмаху коливань Н5 з частотами $\omega_i = y - \omega_n - 2\omega_n - 3\omega_n - 4\omega_n$, що викликають підвищену шорсткість і неперіодичну хвилястість від низькочастотних коливань супорту.

Розраховані значення умовних ймовірностей (ТУЙ) для інших вершин БМ наведені в таблиці табл. 4.5 і на рис. 4.18, 4.19.

Результати розрахунку показують, що ймовірності перевищення допустимих розмахів коливань 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, $p_{\text{Large}}=0,467$).

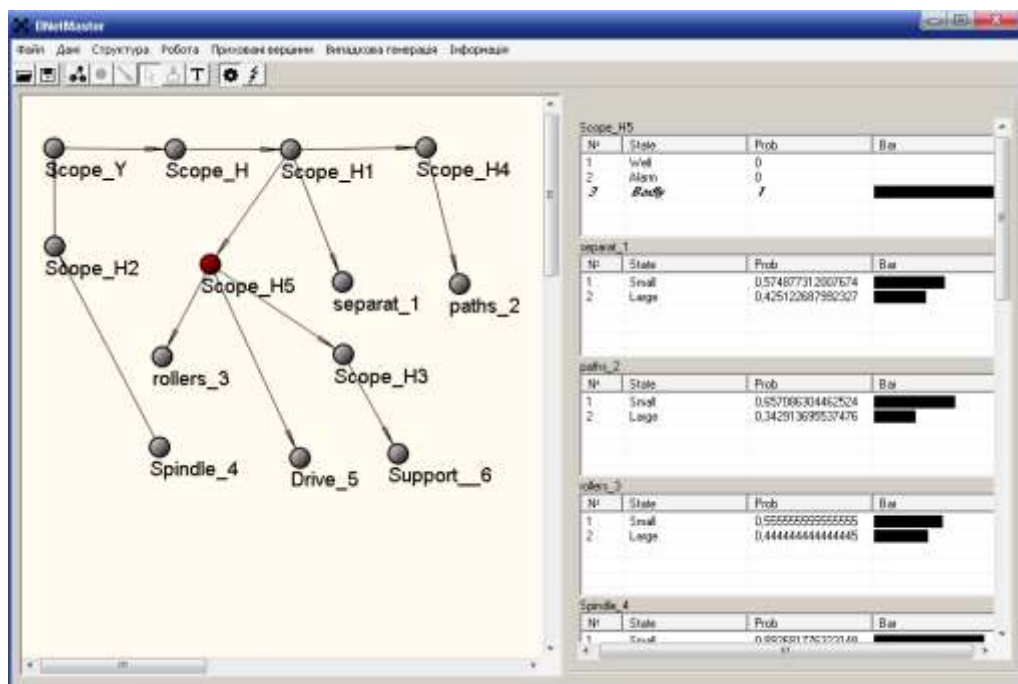


Рис. 4.17. Стани і ТУЙ вершин БМ при ініційованій Score_H5 з $p_{\text{Badly}} = 1$

Таблиця. 4.5

Розраховані умовні ймовірності вершин БМ для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Score_H5 = «Badly»

Умовні ймовірності станів вершин БМ			
Вершини	Well	Alarm	Badly
Score_Y	0,58	0,22	0,2
Score_H	0,521	0,189	0,29
Score_H1	0,265	0,202	0,533
Score_H2	0,726	0,104	0,17
Score_H3	0,222	0,222	0,556
Score_H4	0,357	0,318	0,325
Score_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	

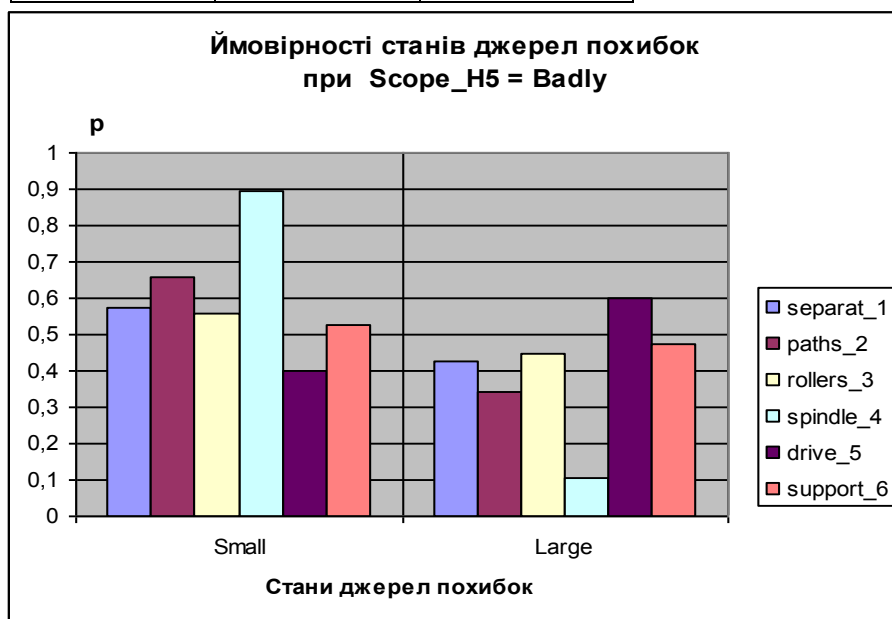


Рис. 4.18. Графічне представлення ТУЙ вершин джерел коливань для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Score_H5 = «Badly»

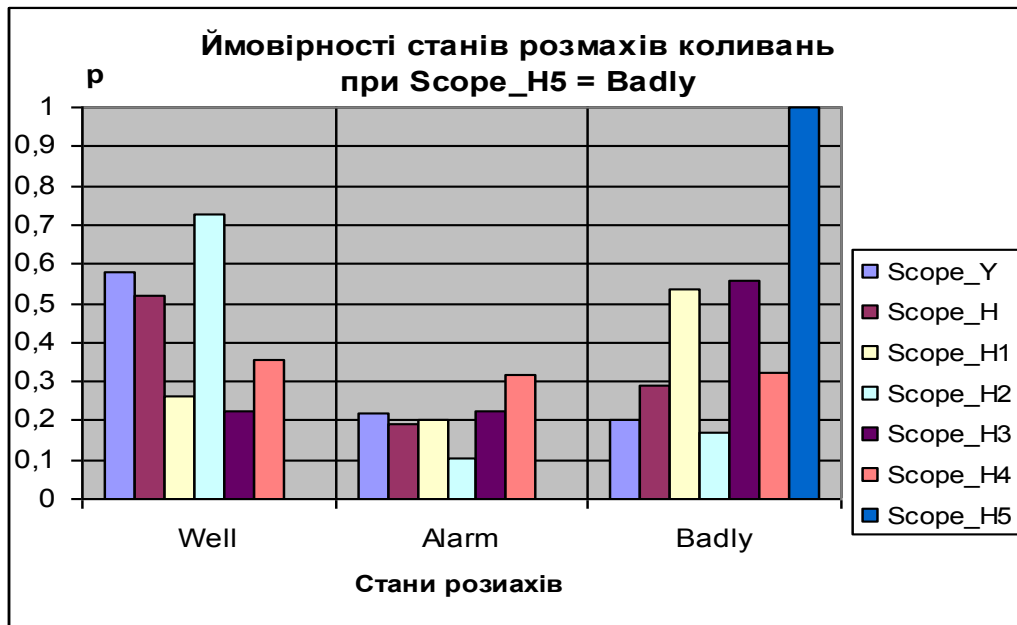


Рис. 4.19. Графічне представлення ТУЙ вершин Score для випадку перевищеного допустимого рівню коливань Score_H5 = «Badly»

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

4.4. Висновки по розділу 4

В даному розділі описано методику діагностування на основі побудови і автоматизованого навчання мережі Байєса і проведено діагностику шпиндельної групи верстата мод. 16M05A. Основними результатами дослідження є:

1. Розроблена модель діагностики причин відхилення форми при повздовжньому точінні і встановлені зв'язки похибок 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 похибок 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 шпindelної групи.

5. Проведено побудову, навчання і аналіз мережі Байєса для діагностування шпindelної групи верстата.

6. З використанням розробленої мережі Байєса проведено діагностику дефектів шпindelної групи для трьох випадків встановлення діагностичних ознак.

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

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Опис об'єкту дослідження і експериментальної установки

Об'єктом дослідження є верстат мод. 16Б05П (рис. 5.1) зі ступінчастою коробкою швидкостей і високоточним шпинделем на підшипниках кочення. Верстат експлуатувався в лабораторних умовах при точному обробленні в основному малих деталей. Середня завантаженість приблизно 2 години при строку експлуатації близько 10 років. При цьому ніякого профілактичного ремонту за цей термін не проводилось. Таким чином, можна вважати, що процеси прироблення стиків повністю відбулися, і верстат задовольняє вимогам класу П.



Рис. 5.1. Об'єкт дослідження - верстат мод. 16Б05П

При дослідженнях використовувалися три лабораторних установки: 1) для визначення модальних параметрів коливальної несучої системи верстата; 2) для виміру статичних навантажувальних характеристик; 3) для вібродіагностики.

5.1.1. Установа для виміру навантажувальних характеристик

На рис. 5.2 показано загальний вигляд установки

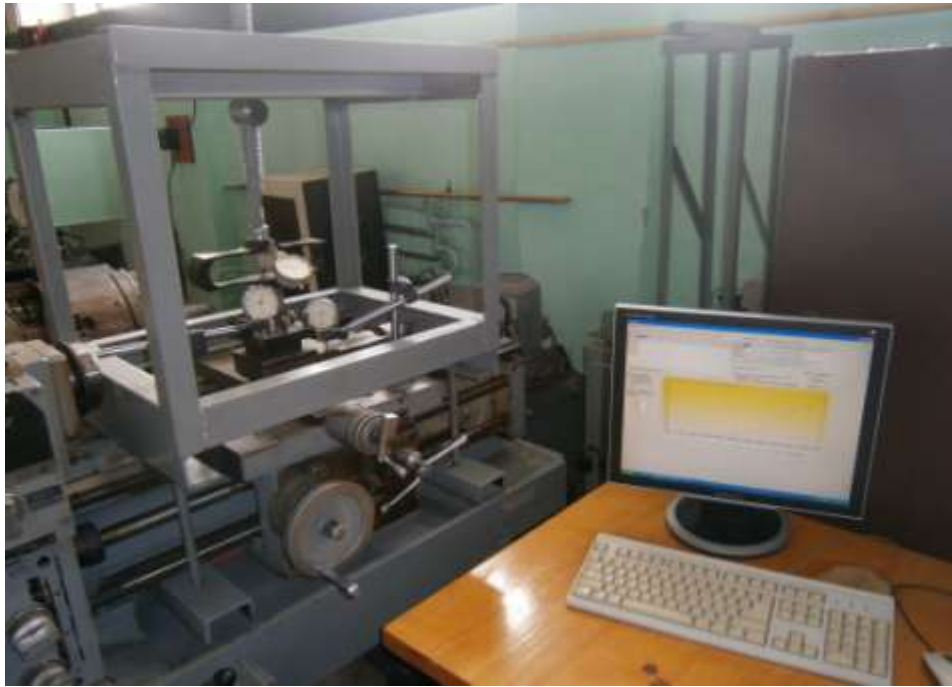
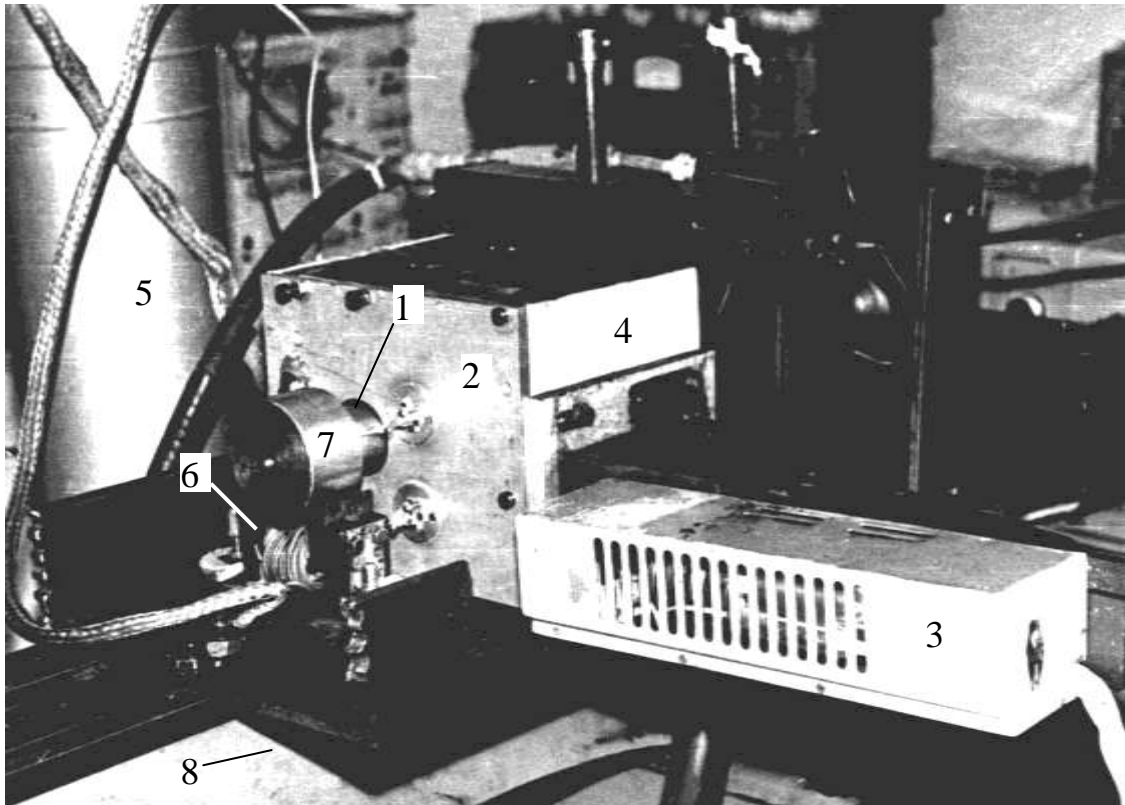


Рис. 5.2. Загальний вигляд установки

Для вимірювання зміщень використовувалися індикатори годинникового типу ИЧ-02, 0-2мм, 0,01мм, кл.т.2; мікрометр годинникового типу з кроком 0,001 і мікрокалор 05ИГПВ з ціною поділки 0,0005 мм. Для вимірювання зусиль використовувався динамометр ДОСМ-3 з граничною силою 2 кН і ціною поділки 0,02 кН.

5.1.2. Установка для визначення модальних параметрів коливальної несучої системи верстата

При експериментах проводилася реєстрація коливань контрольної поверхні оправки 1 (рис. 5.3) одночасно по координатах x і y при його



навантаженні імпульсом сили від електромагніту імпульсного навантажувача 6.
Маса оправки – 5 кг.

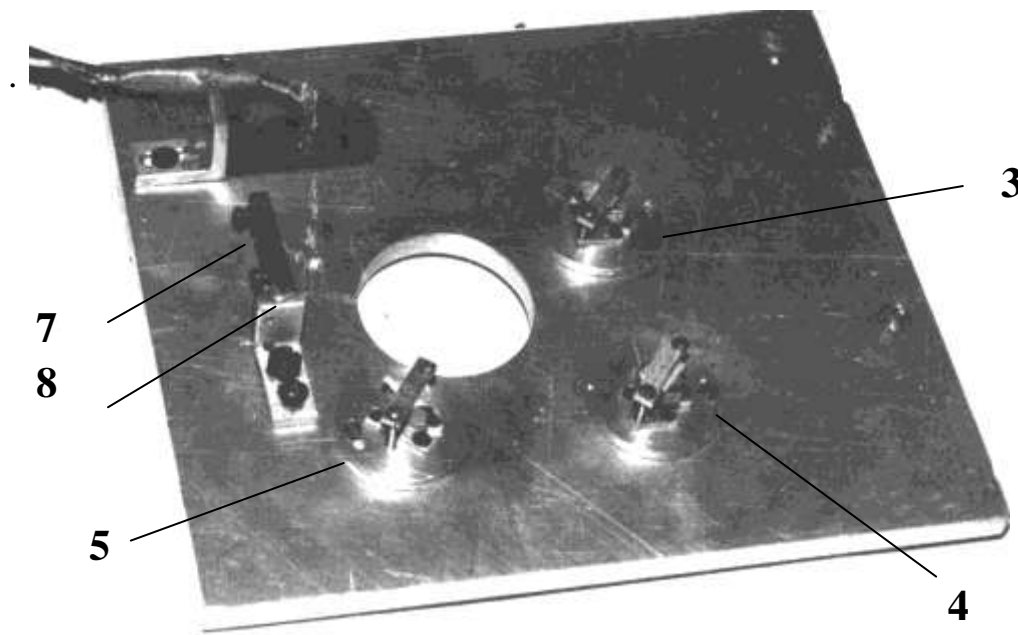
Рис. 5.3. Стенд для експериментальних досліджень навантажувальних характеристик: 1 – вимірювальна поверхня шипа, 2 – панель оптичної схеми, 3 – лазер ЛГ-32, 4 – захисний кожух опори, 5 – батарея розрядних конденсаторів, 6 – електромагніт імпульсного навантажувача, 7 – оправка з магнітом якого матеріалу, 8 – станина верстата мод. 1605П

Оптична схема виміру і загальна структура стенду показані на рис 5.4 і 5.5. Стенд призначений для фіксації перехідних процесів в опорах шпindelних вузлів, що включає і шпindelі на підшипниках кочення.

Вимірювальна оптична схема дозволяє фіксувати переміщення шпindelя в 2-х координатах з похибкою 0,1 мкм. Частотні діапазони виміру:

1) 0 – 1500 Гц; 2) 700 – 10000 Гц.

Сумарна споживана потужність: приводу шпindelя – 2,6 кВт; вимірювальної апаратури – до 200 Вт.



Панель оптичної схеми

1. Лазер ЛГ-32.
2. Модулятор.
3. Напівпрозорий кубик.
- 4, 5. Відхилячі призми.
6. Оправка (вимірювальна поверхня).

7. Щілинна діафрагма.
8. Фокусуючі лінзи.
- 9, 11. Фотоприймачі ФД

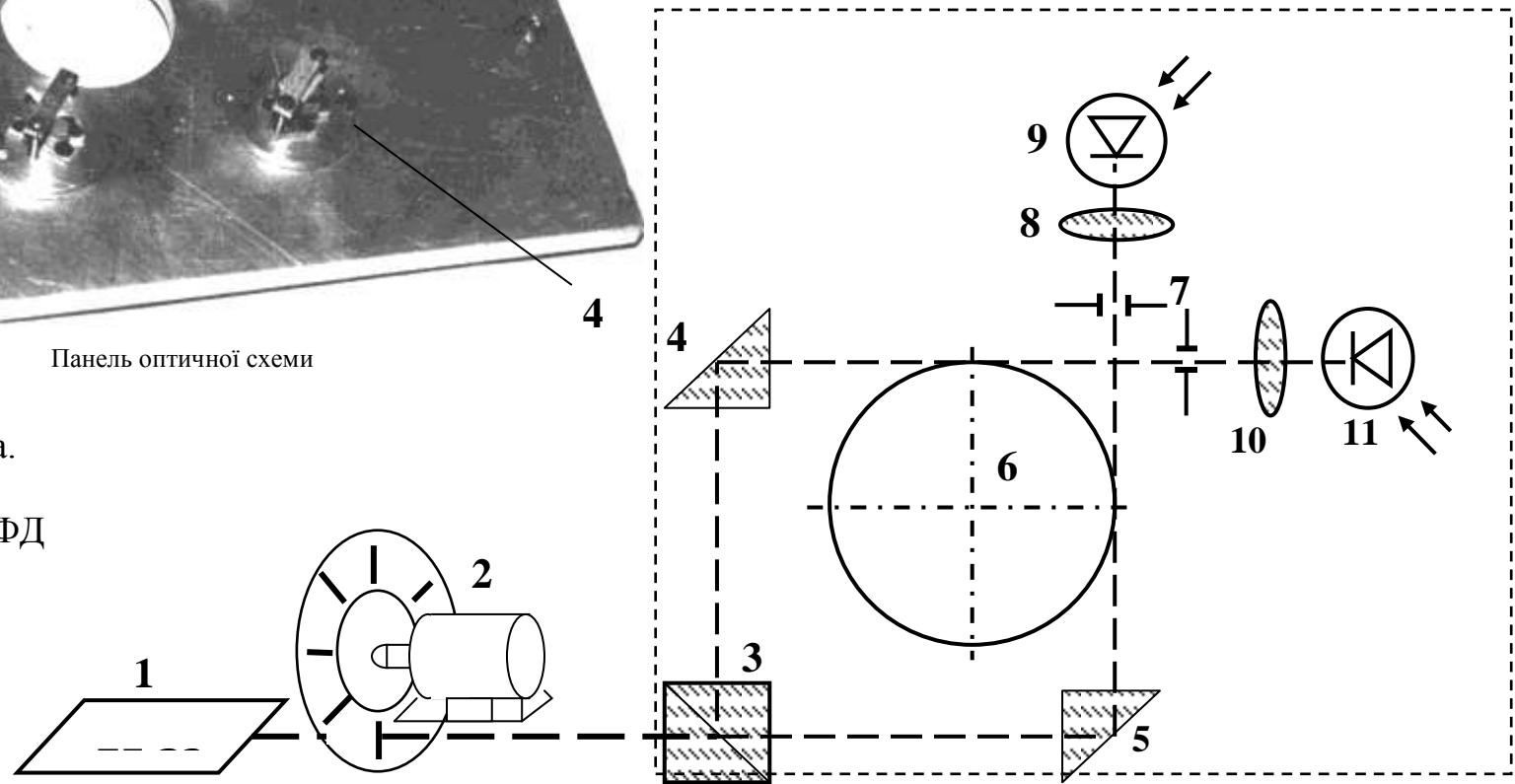
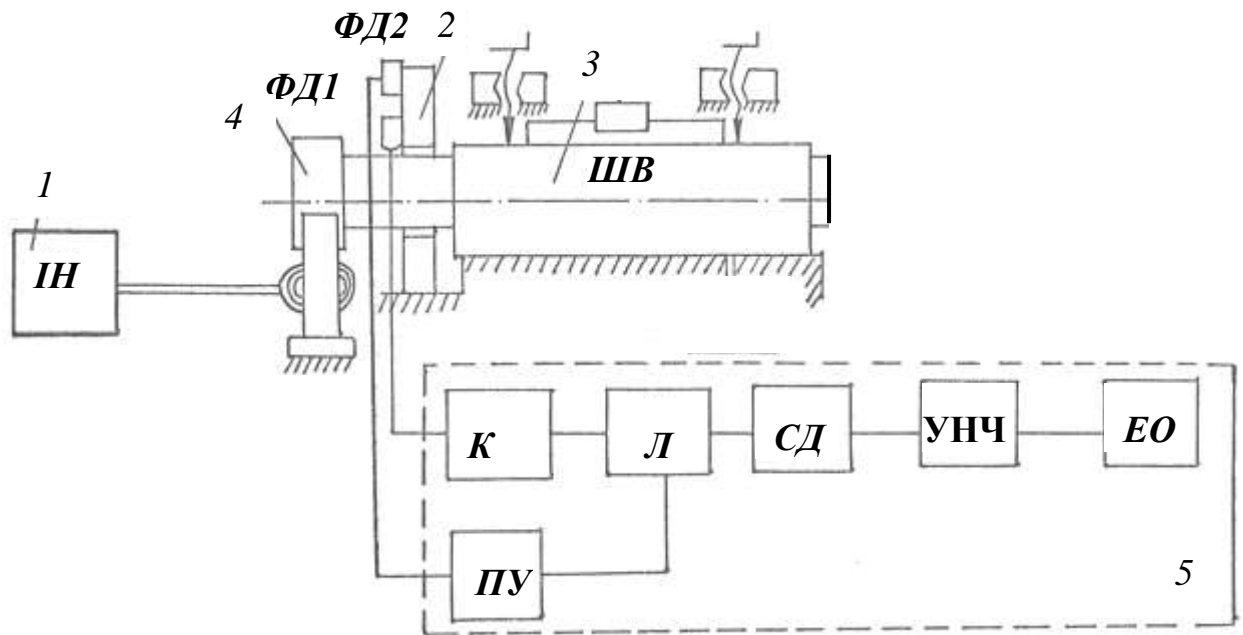


Рис. 5.4. Оптична схема виміру



У комплект стану входять (рис. 5.5): 1 - блок імпульсного навантаження (ІН); 2 – оптична вимірювальна схема; 3 – шпиндельний вузол (ШВ); 4 – контрольна оправка; 5 – електронний блок перетворення вимірювальних сигналів.

З метою усунення биття поверхні контрольної оправки (поз. 4, див. рис. 5.5) вона після встановлення її в отвір шпинделя додатково оброблялися вже на стенді алмазним різцем “до дотику” з малою подачею.

Перед проведенням дослідів шпиндель розкручувався до максимальної частоти обертів на протязі 10...15сек до встановлення стабільного температурного режиму і стійкого “спливання” шипа, яке контролювалося індикатором годинникового типу по координатах x і y . Після того проводилася програмне встановлення на “нуль” показів датчиків ФД1 і ФД2 (див. рис. 5.5).

Вимірювання переміщення шпинделя (див. рис. 5.4) під дією зовнішньої сили здійснюється за рахунок модуляції променя лазера ЛГ – 32 краєм шліфувальної оправки. Промінь проходить через щілинний модулятор 2 (частота модуляції ≈ 5 кГц), потім ділиться світлоділительним кубиком 3 на два взаємно-перпендикулярних променя.

Пройшовши через відхиляючі призми 4 і 5, промінь 4 торкається зовнішньої поверхні оправки 6 і через щілинну діафрагму 7, яка вирізає верхню його неінформативну частину, проектується лінзою 10 на кристал фотодіоду 11 (ФД). Аналогічним чином настраюється промінь, який проходить через відхиляючу призму 5. При вимірюванні переміщення шпинделя в динаміці з використанням синхронного детектування промінь 5 не повинен торкатися поверхні оправки 6. В цьому випадку фотодіод 9 формує опорний сигнал, який знаходиться в фазі з сигналом фотодіоду 11. При налагодженні оптичної схеми особливу увагу необхідно звернути на правильне положення тіні відносно щілинної діафрагми. Межа тіні повинна співпадати з геометричною віссю діафрагм. Налагодженням положення лінзи досягається рівномірна засвітка кристалу фотодіода.

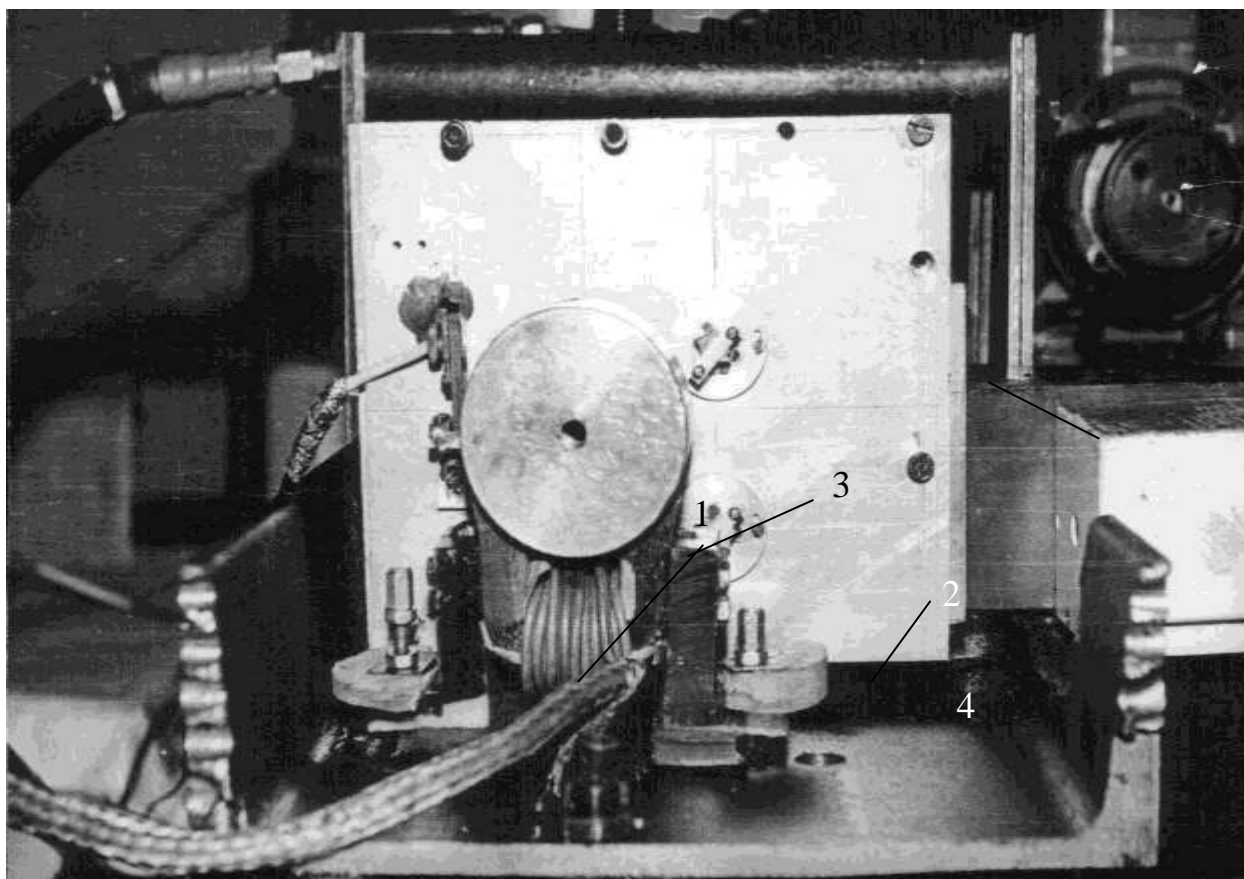


Рис. 5.6. Загальний вигляд панелі оптичної схеми вимірів і імпульсного електромагнітного навантажувача: 1 – магнітом'яка оправка; 2 – панель оптичної схеми; 3 – електромагніт; 4 – лазер ЛГ-32

Призначення пристрою навантаження (див. рис. 5.6, поз. 3) – безконтактна ударна дія на контрольну оправку (див. рис. 5.6, поз. 1) з метою зняття характеристик перехідного процесу. Принцип дії навантажувача полягає у взаємодії магнітного потоку, створюваного могутнім імпульсом струму 100-120 ампер, з облямовуванням, закріпленим на кінці шпинделя і виконаної з магнітом'якого матеріалу (Ст. 3). Тому що реальний імпульс не відповідає ідеальному імпульсу, він був апроксимований спадаючою експонентою. Осцилограма струму через магнітопровід приведена на рис. 5.7, *а*, на рис. 5.7, *б* – графік його апроксимації залежністю: $F=48\exp(-400t)$ з показником затухання $\alpha \approx 400$.

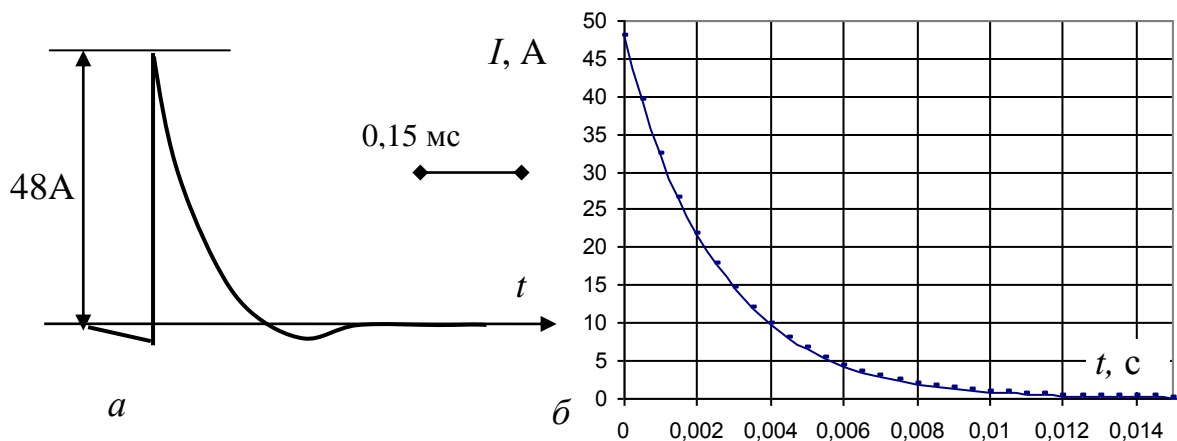


Рис. 5.7. Експериментальна осцилограма імпульсу навантаження модельної опори (*а*) і графічне зображення його апроксимації (*б*)

Струм в котушці наростає до максимального значення 100 А і падає до нуля за 0,11 мс. Спостерігається зміна полярності струму за рахунок короткочасного пропускання зворотного струму тиристором. Повністю перехідний процес завершується за 0,16 мс.

Для тарування системи вимірювання (оптичної схеми) переміщення шипа використовувався факт його «спливання» при сталому температурному режимі. Переміщення шпинделя фіксувалося за допомогою індикатора годинного типу з ціною розподілу 1 мкм і оптико-електронною вимірювальною системою. Максимальна величина зсуву 3 мкм контрольної оправки відповідала

свідченням осцилографа $\sim 2,0$ В, при цьому тарувальна характеристика $U_{\text{вих}}(x)$, В/мкм лінійна, де x – зсув шипа з нульового положення.

5.2. Експериментальне визначення динамічної податливості коливальної системи верстата

Ідентифікація модальних параметрів проводилася на установці П (див. рис. 5.2) в припущенні лінійності і ортогональності коливальної системи шпиндельного вузла згідно методиці, яка описана в п. 3.5.

На рис. 5.8 наведені експериментальний графік загасаючих радіальних коливань контрольної оправки при її імпульсному навантаженні. Час загасання коливань оцінюється величиною $T_3 \approx 30$ мс.

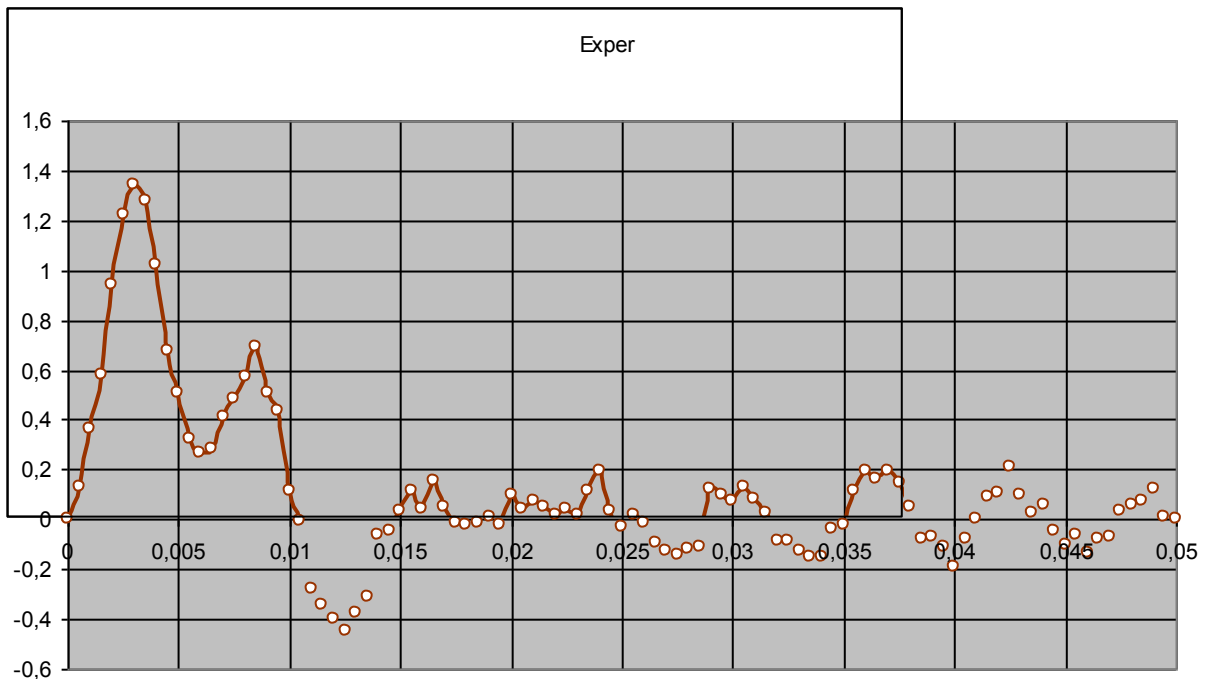


Рис. 5.8. Експериментальний графік радіальних коливань контрольної оправки при імпульсному навантаженні

Фіксація коливального процесу виконувалася протягом 50 мс через 0,5 мс, при цьому число точок (рис. 5.8) на осі t дорівнює $J = 101$.

Для визначення приведених мас шпиндель у зборі зважувався одночасно на двох важелях по підшипникових шийках, які встановлювалися на призмах. Отримано значення: $a_1 = 64,01$ кг; $a_2 = 22,01$ кг. Статичні жорсткості підшипників отримано експериментально і розрахунково, відповідно: $c_1 = 177$ н/мкм; $c_2 = 143$ н/мкм з 95% довірчими інтервалами $\pm 3,4$ н/мкм. Обробка вихідних даних виконувалася програмою Signal [101].

Аналіз результатів (рис. 5.8 – 5.12) дозволяє зробити наступні висновки:

1. Зміщена оцінка середньоквадратичної похибки апроксимації $\sigma = 0,0073$ мкм, двобічний 95% інтервал по залишках – 0,0025 мкм. Тобто точність ідентифікації можна вважати задовільною.

2. Перші дві моди (див. рис. 5.9) з параметрами $(\beta_i; W_i; f_i)$: I (136,8; 1,3; 55) і II (81,95; 0,6; 81) можна віднести до мод вимушених коливань жорсткого шпинделя в опорах тому що їм притаманні найбільші значення β_i .

3. Мода III (66,9; 0,6; 172) за набором параметрів може бути віднесена до коливальної форми податливого шпинделя.

4. Моду IV (26,8; 0,1; 192) з малим значенням параметру W_4 можна кваліфікувати як перешкоду експерименту.

5. Сума перших трьох мод коливань в порівнянні з експериментальною кривою, графіки яких наведені на рис. 5.10, підтверджує попередні висновки.

6. Розкладання коливань багатомасової системи по нормальних координатах можна вважати виправданим при малому відносному демпфуванні по парціальних частотах [6].

7. Запишемо рівняння (3.13, див. п. 3.5) для i -ої нормальної форми у вигляді [6]:

$$\ddot{x}_j + 2\beta_j \dot{x}_j + \omega_{0j}^2 x_j = T_j [1 - \exp(-\alpha t)] 1(t) / a, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (5.19)$$

де $\omega_{0j} = \sqrt{c_j / a_j}$ – власна частота коливань недемпфованої системи;

$\beta_j = 0,5b_j / a_j$ – коефіцієнт демпфування.

Результати оцінки і параметри ω_{0j} , β_j зведені до табл. 5.1.

Расчет | Графики | Моды 1, 2 | Моды 3, 4 | Спектр | Таблица Фурье | Смешанные моды

Допустима область найдена!!!!!!
Розв'язок (екстремальна точка комплексу)
Мода bet W omega Частота, Гц
1: 136.830 1.300 347.929 55.375
2: 81.954 0.600 510.785 81.294
3: 66.939 0.600 1078.202 171.601
4: 26.815 0.100 1207.425 192.168
Точность по критерию delta = 0.00694
Точность по критерию epsilon = 0.00099
Start*** = 63

Ограничения по смещениям

	Y ном. мкм	Y min. мкм	Y max. мкм	v Y	k Y
Узур, мкм	0,5	-0,4	1,4	1	3

Коеф-т затухания импульса нагружения alpha 400
Число экспериментальных точек 101
Шаг по времени, мс 0,5
Отн. точность по X (delta) 0,001
Отн. точность по Y (epsilon) 0,001
Предельное число сжатий комплекса 60000

Ограничения модальных параметров

	Xo->Xopt	Xmin	Xmax	k_X
Bet1,1/c	136,830	120.62	144.74	1
W1, мкм	1,300	1.3	1.52	1
om1, рад/с	347,929	235.67	402.80	1
Bet2,1/c	81,954	77.82	93.39	1
W2 мкм	0,600	0.6	0.8	1
om2, рад/с	510,785	478.54	574.25	1
Bet3,1/c	66,939	33.98	64.77	1
W3 мкм	0,600	0.6	0.88	1
om3, рад/с	1078,202	1084.75	1301.71	1
Bet4,1/c	26,815	10.05	36.06	1
W4 мкм	0,100	0.1	0.2	1
om4, рад/с	1207,425	1067.88	1281.46	

Предварительный Фурье-анализ
nSres: 39 *Внимание!!! Число гармоник разложения nSres должно быть нечетным целым числом*

Преобразовать график | Показатель экспоненты
Вычислить спектр Фурье | Peretv= 50

Сохранить результаты в файле | Moda0.txt
Ввести ограничения из файла | ModEnd.txt

Ср.квдр.ошибка аппроксимации: 0.0148

11:07:24 | START | Рисовать графики | EXIT

Рис. 5.9. Вихідні дані та результати ідентифікації модальних параметрів

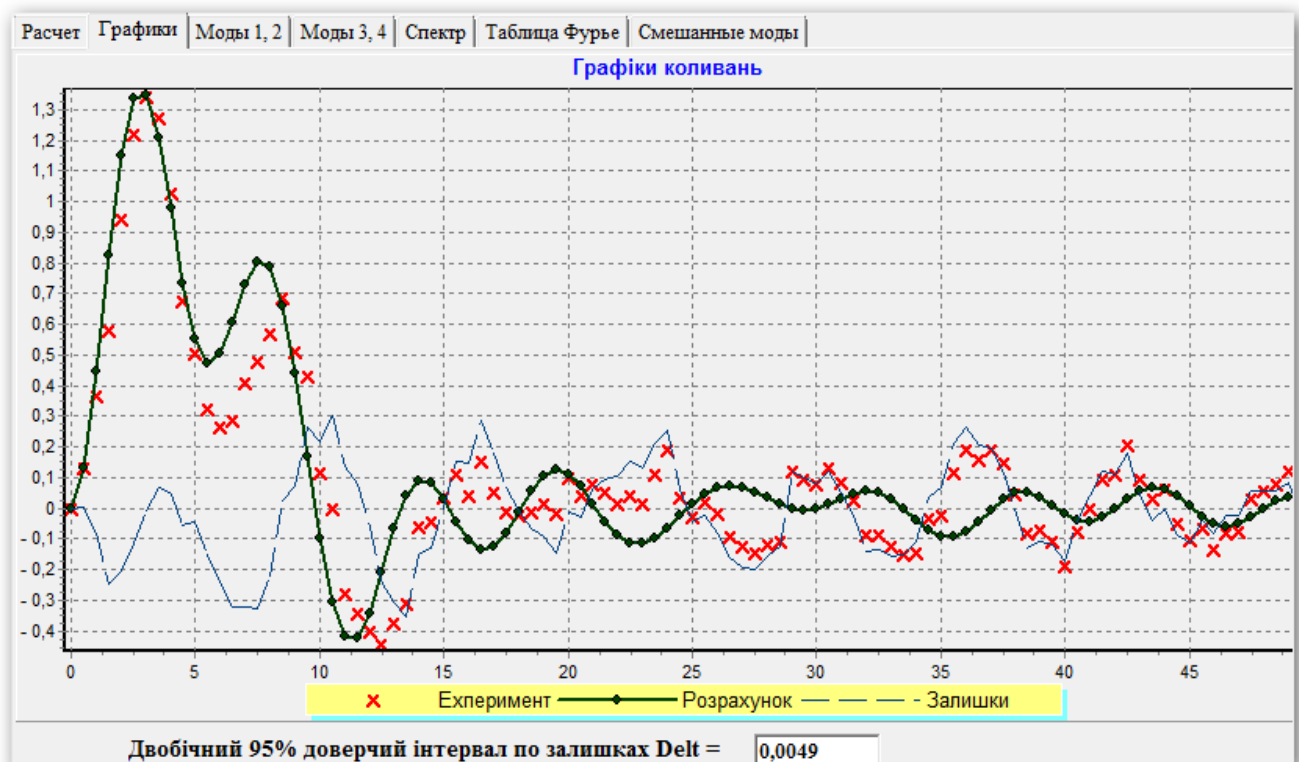


Рис. 5.10. Експериментальна та розрахункова криві коливального процесу

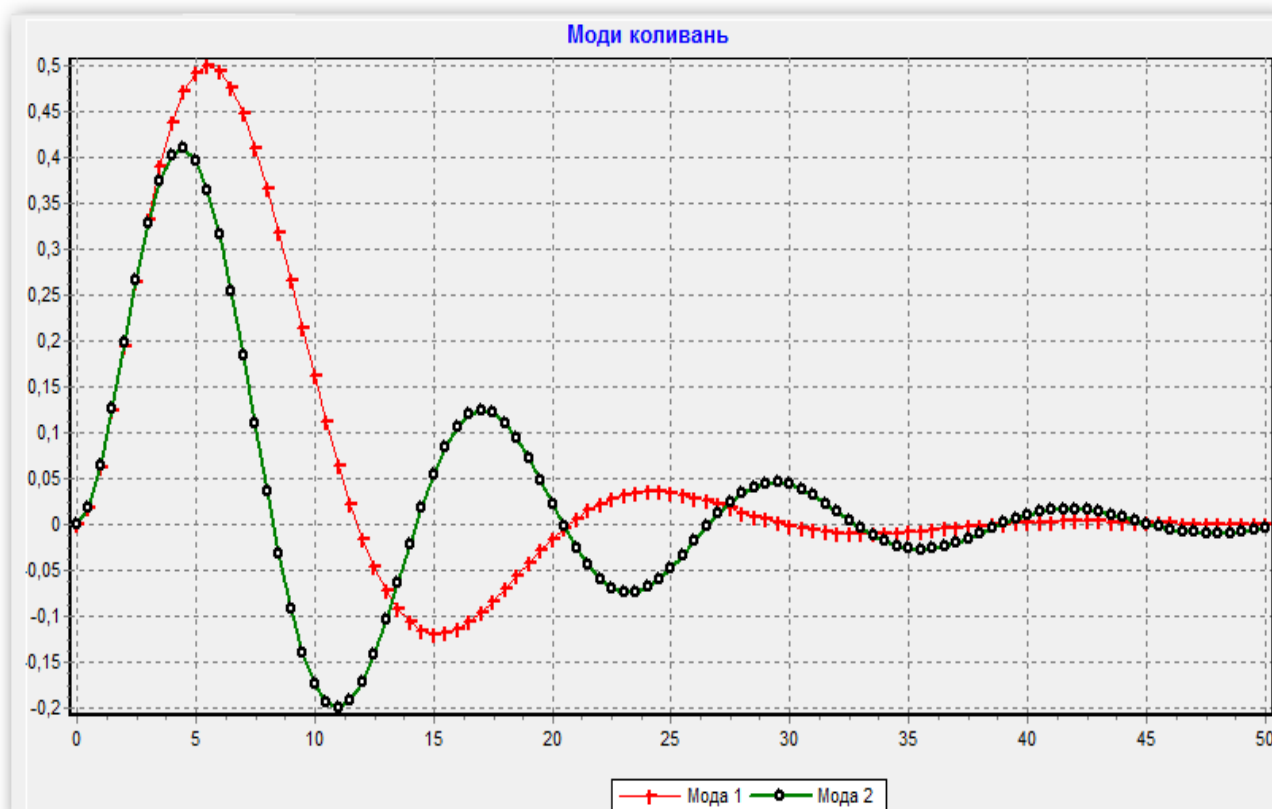


Рис. 5.11. Перша і друга моди коливань

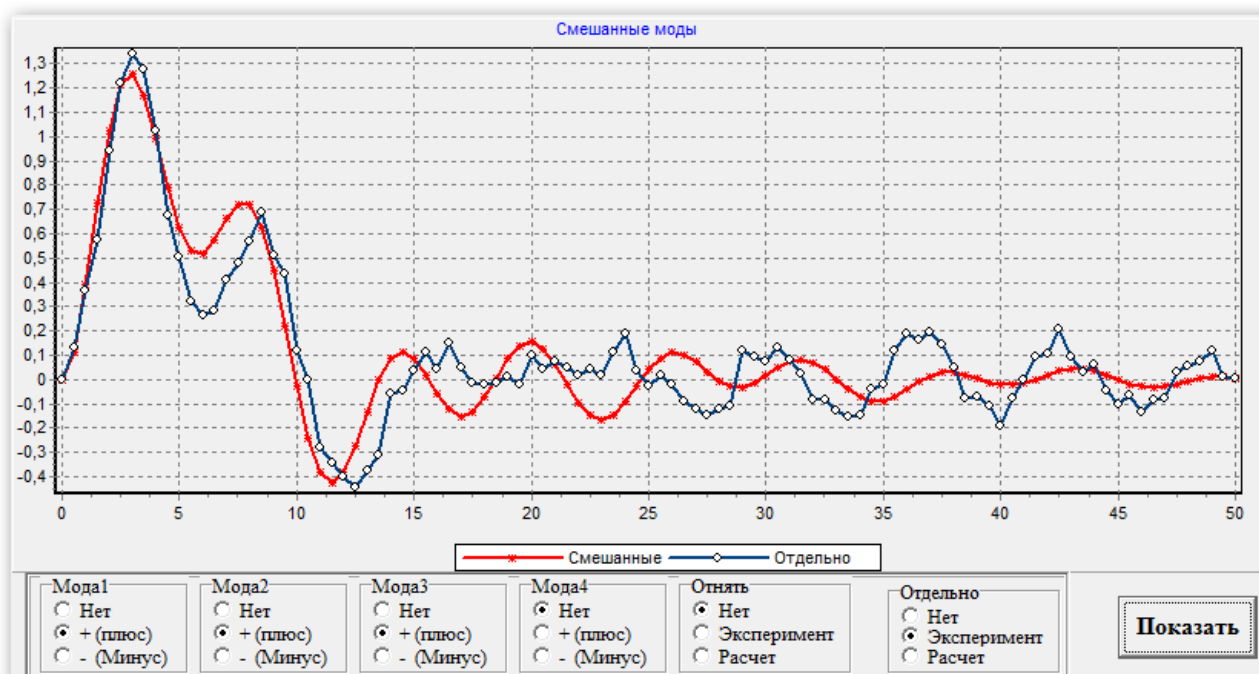


Рис. 5.12. Сума перших трьох мод коливань і експериментальна крива

Модальні параметри коливальної системи

Модальні параметри	Мода i коливань			
	1	2	3	4
$\omega_i, \text{с}^{-1}$	55 Гц	81	172*	192
$\beta_i, \text{с}^{-1}$	136,8	81,95	66,9	26,8
$W_i, \text{мкм}$	1,3	0,6	0,6	0,1
Приведені модальні параметри по модах 1 і 2				
$\omega_{12} = (\omega_1 + \omega_2)/2, \text{с}^{-1}$	68			
$\beta_{12} = \omega_1\omega_2 / (\omega_1 + \omega_2), \text{с}^{-1}$	32,8			
$W_{12} = (W_1 + W_2)/2, \text{мкм}$	0,95			
Розрахункові параметри	1	2	3	4
Приведена маса $a_i, \text{кг}$	14,01	12,01	10,7*	-
Статична жорсткість $c_i, \text{Н/мкм}$	161	137	204*	-
Відносне демпфування $\zeta = \beta_i/\omega_i$	2,49	1,01	0,39	0,14

Примітка.* підтверджено оцінковими розрахунками шпинделя

5.3. Експериментальна перевірка подібності і коінтегрованості процесів розвитку деформованості стиків

Експериментальні виміри виконувалися на установці для виміру навантажувальних характеристик (див. п. 5.1.1).

Експериментальна перевірка подібності і коінтегрованості процесів розвитку деформованості стиків виконувалася згідно розробленим методикам [11] (див. п. 2.1 і п. 2.2) з обробкою результатів вимірів програмами DefStyk (див. Додаток А) і ConRow [99]. Схему навантаження і точки виміру зміщень елементів ТПС верстата показано на рис. 5.13.

Сила P прикладається динамометричним пристроєм до поворотного супорта (див. рис. 5.13) під кутами до координатних осей, що забезпечує розкладання сили на складові у напрямі координати Y відповідно до табл. 5.2 і рис. 5.14. В табл. 5.2 приведені усереднені свідчення відповідних індикаторів у напрямі координати Y . Повторні навантаження проводилися трьома серіями з усереднюванням свідчень індикаторів. При цьому для гарантованого вибору

зазорів в першій точці навантаження приймалося рівним 20 Н. На рис. 5.14 крива 1- 0 є зміщення поворотного супорту 1 відносно вимірювальної бази – направляючих станини.

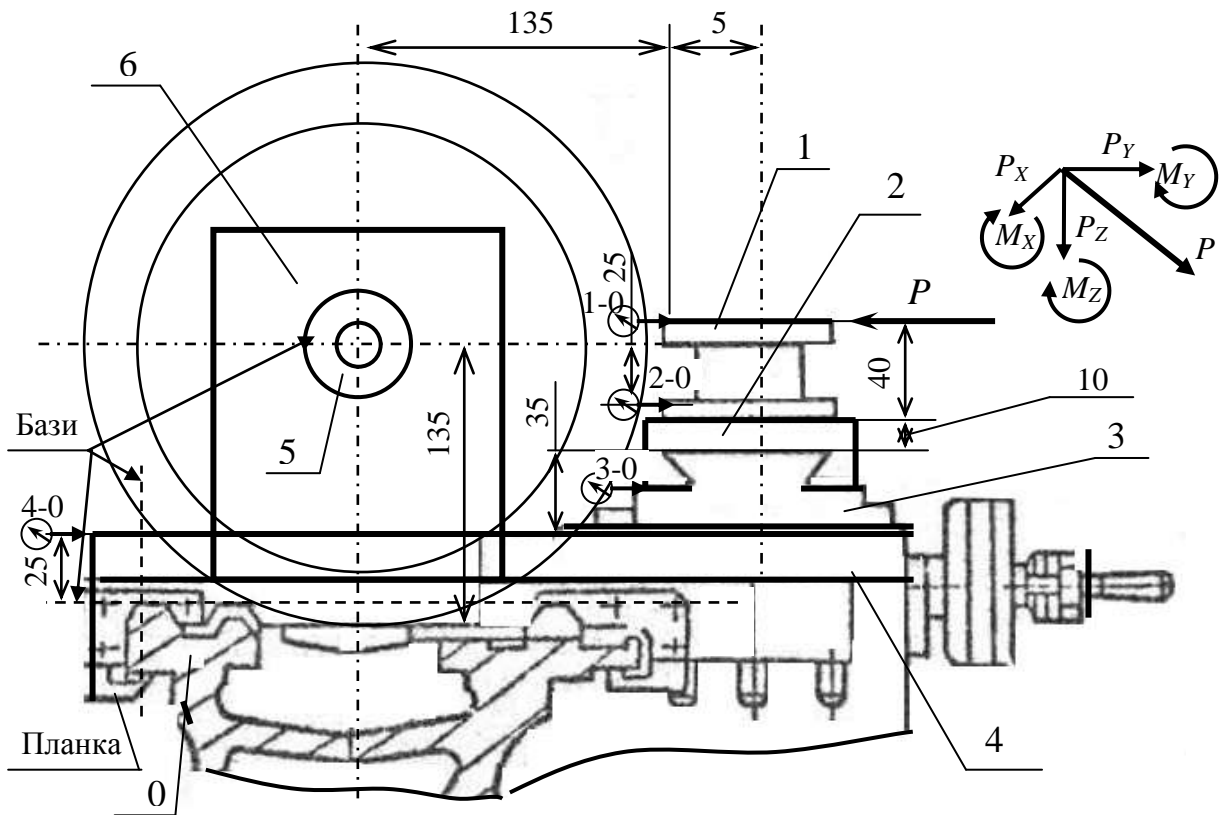


Рис. 5.13. Схема навантаження і вимірів зміщень: P – навантаження; 1 – поворотний супорт; 2 – повздовжні санчата; 3 – поперечні санчата; 4 – подовжній супорт; 5 – шпиндель; 6 – передня бабка; «Бази» – вимірювальні бази по координатах для мікрометрів

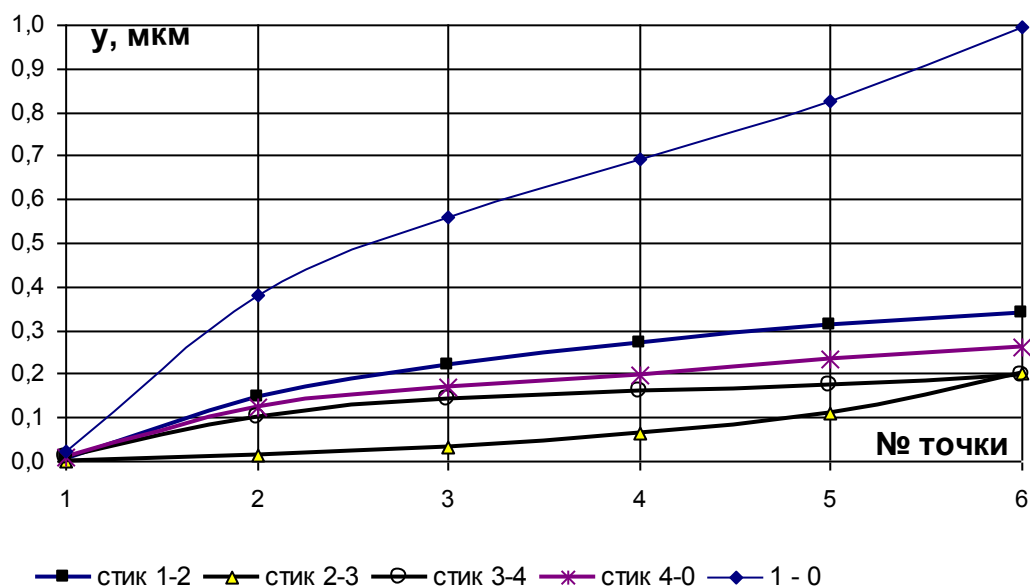


Рис. 5.14. Криві зміщення деталей супортної групи

Таблиця 5.2

Навантаження і зсуви елементів супортної групи верстата

Стик	№ п/п	Сила P , Н	Зміщення y , мкм	Фото
1-2	1	20	0,005	
	2	250	0,145	
	3	500	0,22	
	4	750	0,27	
	5	1000	0,31	
	6	1250	0,34	
2-3	1	20	0	
	2	250	0,012	
	3	500	0,03	
	4	750	0,064	
	5	1000	0,11	
	6	1250	0,20	
3-4	1	20	0,011	
	2	250	0,10	
	3	500	0,141	
	4	750	0,162	
	5	1000	0,174	
	6	1250	0,195	
4-0	1	20	0,009	
	2	250	0,126	
	3	500	0,17	
	4	750	0,198	
	5	1000	0,233	
	6	1250	0,26	

5.3.1. Експериментальна перевірка подібності

Експериментальна перевірка подібності розвитку деформацій проводилася при послідовному ослабленні натягу рейки на направляючих станини (див. рис. 5.13) на величину $\frac{1}{4}$ оберту гвинтів на усій довжині прилягання. При цьому в табл. 5.3 і на рис. 5.14 позначені покази індикаторів від бази «направляючі станини» поворотного супорту і 4-0 поперечного супорту. В дужках позначено ослаблення натягу гвинтів на величину оберту: (1) – $\frac{1}{4}$; (2) – $\frac{2}{4}$; (3) – $\frac{3}{4}$.

Завдання полягає в програмній ідентифікації кривих 4-0(i) за свідченнями індикатора 4-0 з подальшим їх порівнянням із заміряними значеннями (див. рис. 5.14, а). Для порівняння приведені також свідчення індикаторів 1-2, 2-3 і 3-4 (див. табл. 5.3 і рис. 5.14, б) без ослаблення натягу рейки (див. рис. 5.13).

В таблицях 5.4 і 5.5 приведені коефіцієнти поліномів подібності порядків 1 і 2, а також їх оцінки σ і var_σ . На рис. 5.15 наведені графіки подібності кривих 4-0(i), 1-2, 2-3 і 3-4 від еталону 4-0, розраховані за програмою DefStyk.

Таблиця 5.3

Зсуви елементів суппортної групи верстата в точках навантаження по індикаторах 4-0(i), 1-2, 2-3 і 3-4

Точка	1	2	3	4	5	6
4-0	0,009	0,126	0,17	0,198	0,233	0,26
4-0 (1)	0,011	0,141	0,192	0,231	0,274	0,316
4-0 (2)	0,011	0,148	0,205	0,254	0,305	0,36
4-0 (3)	0,01	0,154	0,226	0,286	0,354	0,416
1-2	0,005	0,145	0,22	0,27	0,31	0,34
2-3	0,001	0,012	0,03	0,064	0,11	0,2
3-4	0,011	0,1	0,141	0,162	0,174	0,195

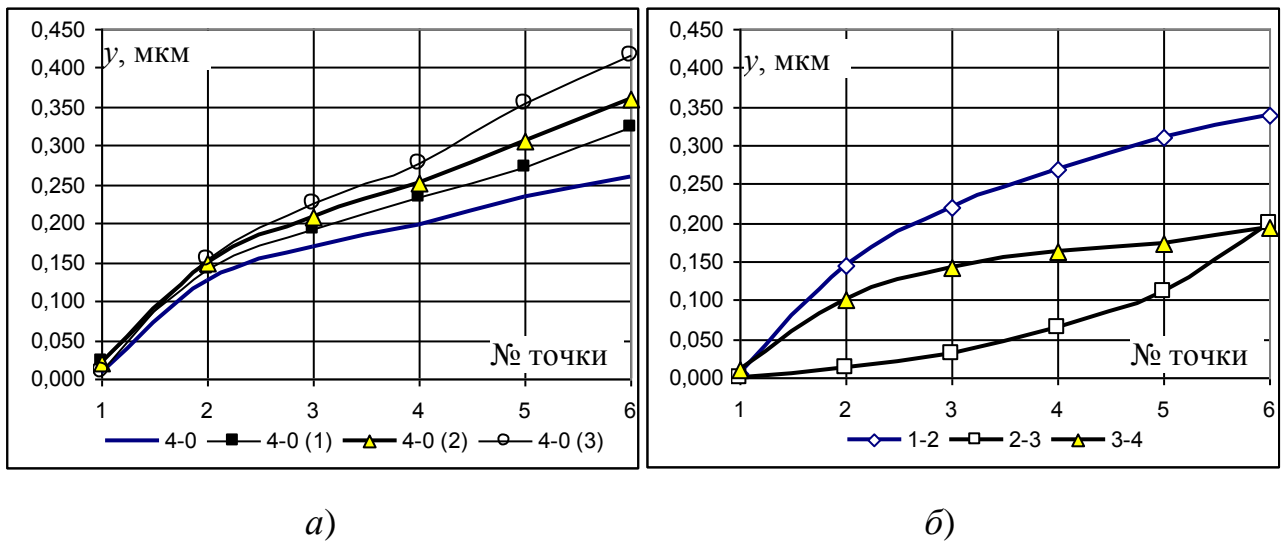


Рис. 5.14. Зміщення по індикаторах (див. рис. 5.13): а) 4-0 при ослабленні натягу гвинтів рейки на величину оберту: (1) – 1/4; (2) – 2/4; (3) – 3/4; б) покази індикаторів 1-2, 2-3 и 3-4 без ослаблення натягу рейки

Таблиця 5.4

Коефіцієнти поліномів $R^1(p)$ для ПЕі від еталону 4-0

Стик	c_0	c_1	σ , МКМ	var_σ
4-0	1	0	0	0
4-0 (1)	1,154	0,005	0,00002	0,000103
4-0 (2)	1,134	0,037	0,00001	4,68E-05
4-0 (3)	1,026	0,099	0,00001	4,15E-05
1-2	0,73	0,125	0,00015	0,002326
2-3	-0,132	0,131	0,00024	0,003453
3-4	1,111	-0,072	0,00018	0,000613

Таблиця 5.5

Коефіцієнти поліномів $R^2(p)$ для ПЕі від еталону 4-0

Стик	c_0	c_1	c_2	σ , МКМ	var_σ
4-0	1	0	0	0	0
4-0 (1)	1,272	-0,084	0,013	0,00000	0,00000
4-0 (2)	1,233	-0,038	0,011	0,00000	0,00000
4-0 (3)	0,979	0,134	-0,005	0,00000	0,00000
1-2	0,097	0,599	-0,068	0,00005	0,00023
2-3	0,174	-0,099	0,033	0,00004	0,00058
3-4	1,4	-0,288	0,031	0,00002	0,00015

Порівняння таблиць 5.4 і 5.5 по величинах σ дозволяє відзначити статистично помітні значення σ для кривих 4-0(i) і для кривих 1-2, 2-3 і 3-4. При цьому відмінність значень σ зменшується при збільшенні порядку n поліномів подібності $R^n(\mathbf{p})$. При збільшенні порядку n до 3-х і вище за значення σ стають статистично не помітні. Отже, розпізнаваність кривих деформації збільшується із зменшенням порядку n поліномів подібності $R^n(\mathbf{p})$. Цей же вивід можна зробити і відносно показника var_σ .

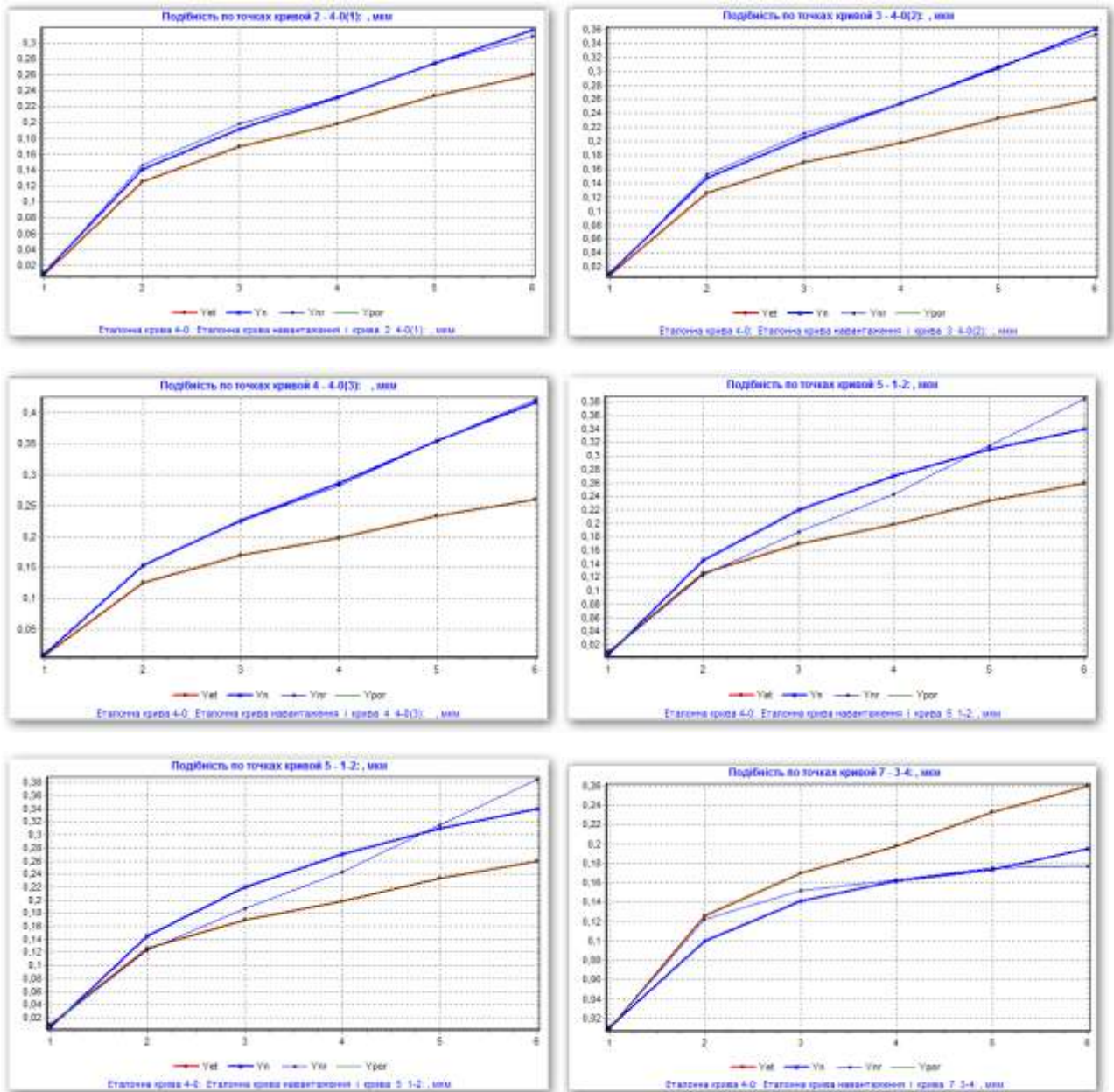


Рис. 5.15. Графіки подібності кривих 4-0(i), 1-2, 2-3 і 3-4 від еталону 4-0, розраховані по програмі DefStyk

5.3.2. Експериментальна перевірка коінтегрованості

Експериментальна перевірка подібності і коінтегрованості процесів розвитку деформованості стиків виконувалася згідно розробленої методики (див. п. 2.2) за допомогою програми ConRow.

Завдання полягає в програмній ідентифікації кривих 4-0(i) за свідченнями індикаторів 1-0(i) з подальшим їх порівнянням із зміряними значеннями 4-0(i). За еталонну береться пара кривих 1-0 і 4-0 (рис. 5.16 і табл. 5.6). При цьому ідентифікується крива 4-0(3) по зміряній кривій 1-0(3), а решта кривих, еталонних і з індексами (1), (2) – є навчальною вибіркою.

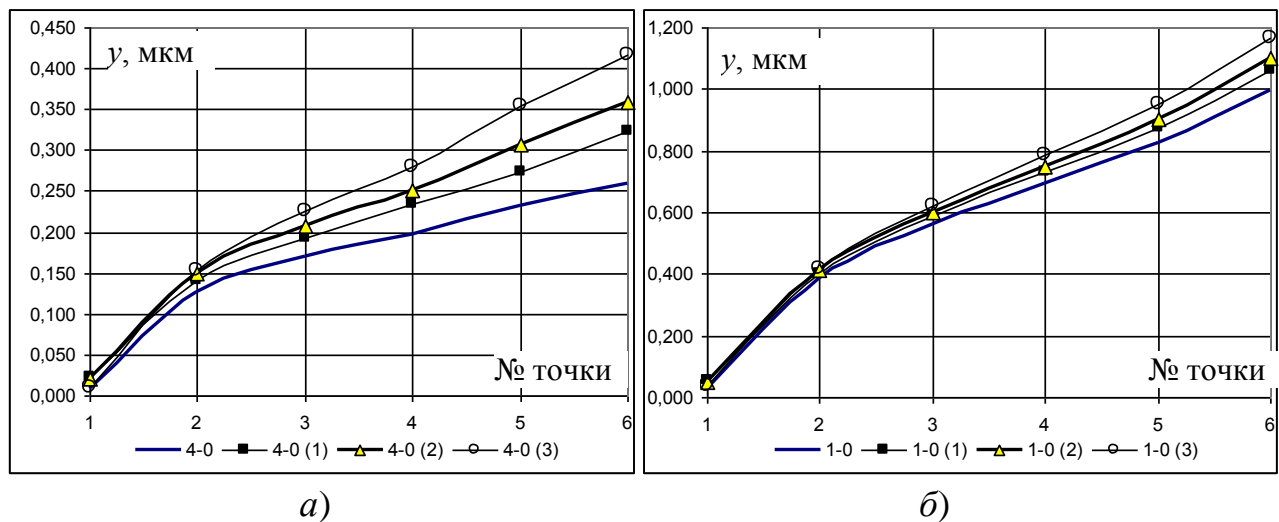


Рис. 5.16. Зміщення по індикаторам (див. рис. 5.13): а) 4-0(i) і 1-0(i) при ослабленні натягу гвинтів рейки на величину оберту: (1) – 1/4; (2) – 2/4; (3) – 3/4

Таблиця 5.6

Результати виміру деформацій

від параметру навантаження P і номера точки (№) , мкм

P, H	№	1-0	1-0(1)	1-0(2)	1-0(3)	4-0	4-0(1)	4-0(2)	4-0(3)
20	1	0,025	0,030	0,028	0,028	0,011	0,009	0,011	0,01
250	2	0,383	0,403	0,412	0,418	0,126	0,141	0,148	0,154
500	3	0,561	0,590	0,600	0,622	0,17	0,192	0,205	0,226
750	4	0,694	0,738	0,758	0,789	0,198	0,231	0,254	0,286
100	5	0,827	0,875	0,900	0,952	0,233	0,274	0,305	0,354
1250	6	0,995	1,053	1,101	1,156	0,26	0,316	0,36	0,416

На рис. 5.16 представлені результати роботи програми ConRow. Графік ідентифікації показує практичний збіг зміряної $F(t)$ та ідентифікованої кривої $\Phi(t)$.

На рис. 5.17 представлений протокол роботи програми ConRow, з якого видно, що помилка ідентифікації кривої $\Phi(t)$ порівняно із зміряними значеннями кривої 4-0(3) не перевищує 3,9%. Регресійні моделі 2-го порядку згладжування кривої $\Phi[u(t)]$ і вагової функції $h[u(t)]$ відновлені з середньоквадратичними відхиленням відповідно 0,003 і 0,009.

Відповідні коінтеграційні авторегресійні моделі CR(2) функцій $\Phi[u(t)]$ і $h[u(t)]$ мають випадкові величини залишків, що дозволяє судити про адекватність цих моделей.

Лагова кореляція з максимальною довжиною лага 4 (рис. 5.18) між кривими $u(t)$ і $\Phi(t)$, тобто між кривими 1-0(i) і 4-0(i), вище за критичні значення і практично для всіх лагів близька до 1, що говорить про надзвичайно високу точність ідентифікації (прогнозування).

На рис. 5.19 представлені основні коінтеграційні статистики [81] на рівні значущості $q=0,05$, які також свідчать про коінтеграційний зв'язок кривих 1-0(i) і 4-0(i).

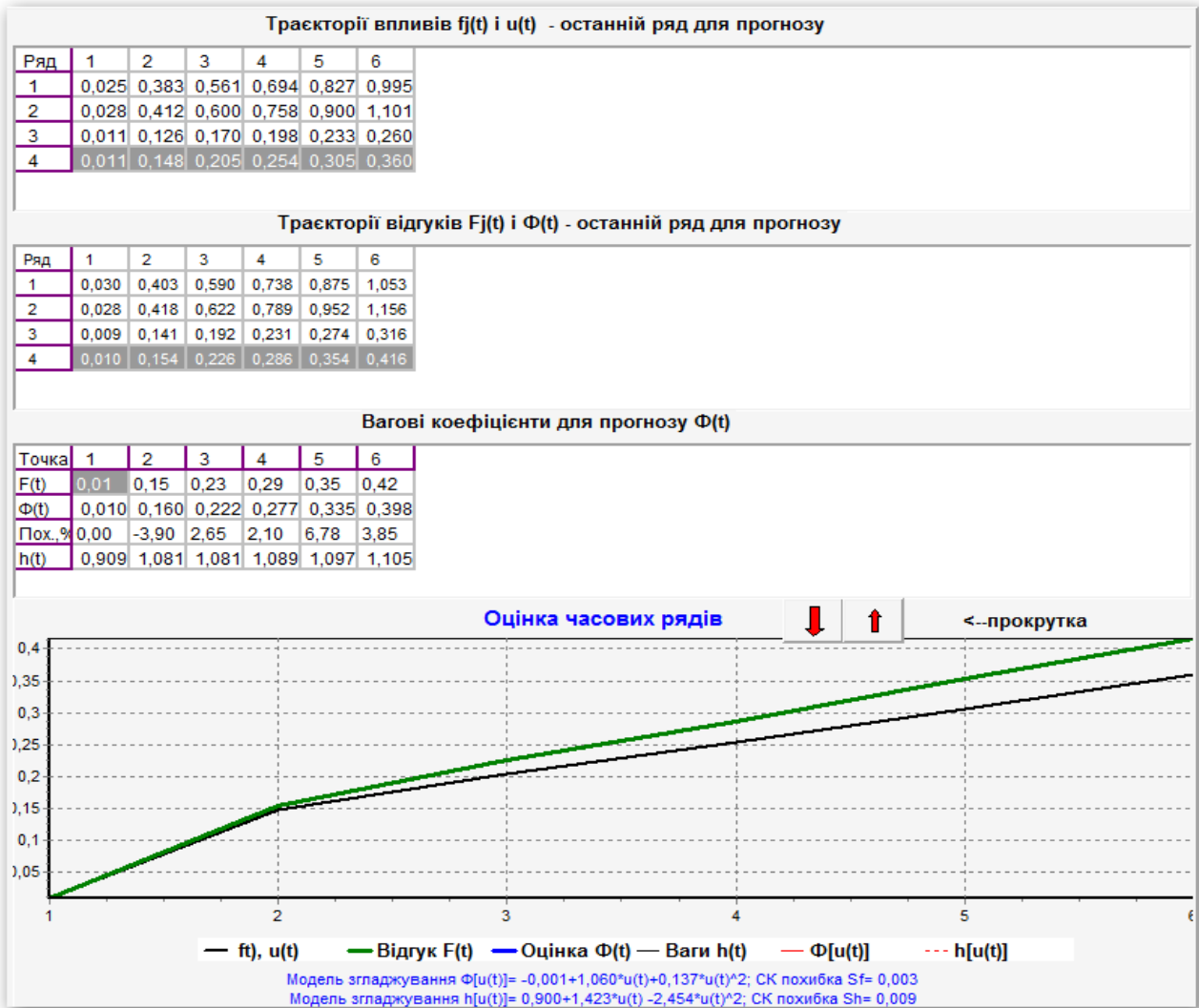


Рис. 5.16. Результати роботи програми ConRow

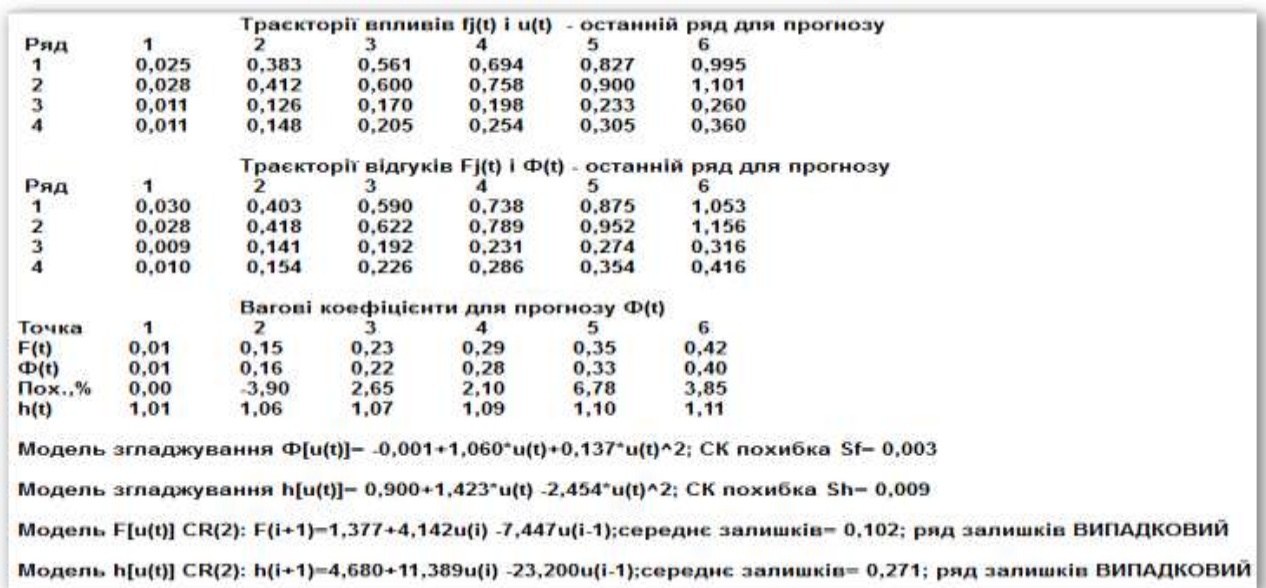


Рис. 5.17. Протокол роботи програми ConRow

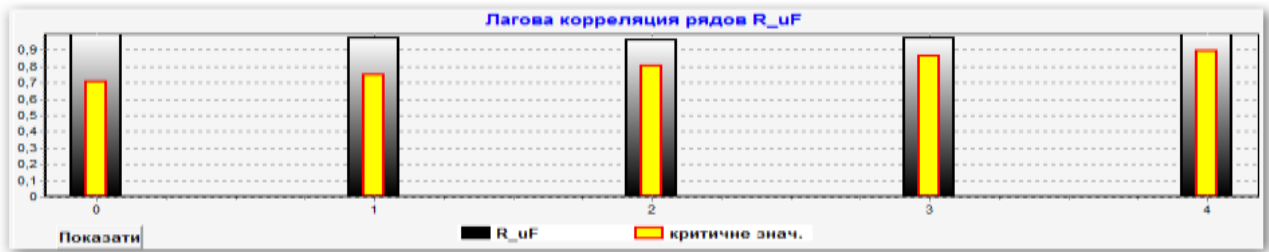


Рис. 5.18. Лагова кореляція між кривими 1-0(i) і 4-0(i)

Статистика, рівень значущості, %		
Стат. показник для пари рядів №4	Значення	Коментар
Коефіцієнт кореляції $R_{fF} =$	0,999	Лін. стохаст. зв'язок
Коефіцієнт детерміації $R^2 =$	0,998	повний
Автокореляція залишків порядку 1	0,723	помірний
Автокореляція залишків порядку 2	-1,000	повний
Гіпотеза про коінтеграцію $f(t)$ і $F(t)$:		
a) по Інглу-Гренджеру $T_{kr}=1,944$	$T = 0,513$	Не відкидається
b) по Дарбину-Уотсону $DW_{kr}=0,386$	0,237	Відкидається
Порядок інтеграції ряду $f(t)$:	1	можл. детермінований
Порядок інтеграції ряду $F(t)$:	1	можл. детермінований

Рис. 5.19. Основні коінтеграційні статистики

5.4. Висновки по розділу 5

В даному розділі виконувалася експериментальна перевірка основних теоретичних положень, які викладені в розділах 2 і 3 на прикладі верстата мод.16M05A. Основними результатами дослідження є:

1. Розроблені установки для визначення динамічної податливості коливальної несучої системи верстата і виміру статичних навантажувальних характеристик «навантаження – деформація».

2. Проведені експериментальні дослідження динамічної податливості елементів несучої системи за розробленою методикою показали високу точність ідентифікації власних частот коливань, статичної жорсткості і демпфування елементів несучої системи.

3. Проведені експериментальні дослідження характеристик «навантаження – деформація» підтверджують припущення про те, що розвиток в часі форми кривих контактної деформації розвиваються в часі подібно, а навантажувальні характеристики «навантаження – деформація» послідовно зв'язаних елементів несучої системи коінтегровані при їх зміні у часі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі одержали вирішення задачі, спрямовані на підвищення техніко-економічних показників металорізальних верстатів шляхом вдосконалення безрозбірної діагностики стану елементів їх несучої системи. При цьому отримані наукові та практичні результати:

1. Теоретично і експериментально встановлено припущення про подібність і коінтегрованість розвитку процесів зміни деформаційних властивостей стиків токарних верстатів. Доведено, що зміна властивостей деформованості стиків по кривим «навантаження – деформація» відносно параметра p відбувається за процесом $F(p) \sim F_e(p) R^n(p)$ пропорційно – еталонної кривої F_e і масштабуючої функції $R^n(p)$ – поліному ступеня n . При цьому розходження кривих «навантаження – деформація» збільшується зі зменшенням порядку n поліномів подібності $R^n(p)$.

2. Науково обґрунтовано припущення про функціональний зв'язок (коінтеграцію) між деформаційним процесом u , який вимірюється, і прихованим процесом Φ , який треба діагностувати. Розроблено методика і програмно-математичне забезпечення для експериментально-розрахункової оцінки і діагностики деформаційних властивостей стиків. Доведено, що характеристики «навантаження – деформація» послідовно зв'язаних елементів несучої системи коінтегровані при їх зміні у часі.

3. На основі моделювання діагностики динамічних властивостей елементів несучої системи верстату за результатами розрахунково-експериментального модального аналізу обґрунтовано, що регресори і графіки зсувів від силових чинників в стику по координатах верстата служать деформаційним паспортом вузла верстата, на основі якого можна розраховувати і прогнозувати його вплив на точність обробки.

4. На основі розгляду Фур'є – аналізу кривої биття шпindelного вузла встановлено діагностичні ознаки похибок форми при повздовжньому точінні і зв'язки по частотах між джерелами похибок і діагностичними ознаками.

5. Вперше розроблено і апробовано матричні моделі вібраційної діагностики елементів несучої системи верстату з використанням методів на основі імовірнісних ланцюгів. Встановлені модальні і відновлені (розрахункові) параметри коливальної системи верстата, які при 4-ох модах коливань становить для коефіцієнт затухання $\beta_i(\text{с}^{-1})$ від 123,4/105 до 30,2/25,0 і точності обробки W_i (мкм) від 1,1/0,95 до 0,06/0,12 при середньоквадратичній похибці апроксимації в межах $\sigma = 0,0073/0,0075$.

6. На основі експериментальних досліджень динамічної податливості елементів НС верстата за розробленою методикою встановлено високу точність ідентифікації власних частот коливань, статичної жорсткості і демпфування елементів несучої системи. Відмінність між теоретичними і експериментальними розрахунками становить 6-8%.

7. Результати досліджень впроваджені при модернізації верстатів на АТ «СКФ Україна» (публічне) (м. Луцьк), ДП «Автоскладальний завод №1» (м. Луцьк). Результати досліджень також використовуються в навчальному процесі на кафедрі комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування Луцького НТУ при викладанні курсів лекцій «Металообробне обладнання» і «Обладнання та транспорт механообробних цехів», а також в курсовому та дипломному проектуванні.

Список використаних джерел

1. Автоматизація технологічних процесів у машинобудуванні засобами мікропроцесорної техніки: Навч. посіб./ Ю. В. Петраков, П. П. Мельничук; Житомир. інж.-технол. ін-т. – Житомир, 2001. – 194 с.
2. Атопов В.И., Сердобинцев Ю.П., Славин О.К. Моделирование контактных напряжений, – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Изд. Центр СПбГМТУ, 2000 г. 159 стр.
4. Безперервна динамічна компенсація пружних переміщень деталей малої жорсткості при токарній обробці / О. І. Бохонський, Є. В. Пашков, О. В. Голубєв // Вісн. Житомир. інж.-технол. ін-ту. Техн. науки. – 1999. - № 10. – С. 43-46.
5. Бреев В.Т., Гольдфарм О.М., Ухорский С.Г. Исследование различных типов направляющих шлифовальной бабки круглошлифовального станка// Станки и инструмент – 1970 – № 12. С. 3 – 7.
6. Бэк Н., Бурдекин М., Кавли А. Анализ контактных деформаций методом конечных элементов // Автоматические линии и металлорежущие станки. 1975.- № 45.- С.18-33.
7. Верзаков Г.Ф. и др. Введение в техническую диагностику. Под ред. К.Б. Карандеева. – М.: Энергия, 1968. – 224 с.
8. Вибрации в технике: Справочник.- М.: Машиностроение, 1980. Т.1. – 1980. – 402 С.
9. Визначення динамічних властивостей пружної системи супорта токарного верстата за допомогою стохастичної математичної моделі / В. Б. Струтинський, О. В. Даниленко // Вісн. Житомир. інж.-технол. ін-ту. Техн. науки. – 1999. - № 10. – С. 22-27.

10. Внуков, Юрій Миколайович. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів [Текст] : навч. посіб. / Ю. М. Внуков, В. О. Залога. – Суми : Сум. держ. ун-т, 2010. – 246 с.

11. Врагов Ю.Д. Анализ компонок металлорежущих станков, – М.: Машиностроение, 1978.- 207 с.

12. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости, – М.: Наука, 1980,- 304 с.

13. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Обобщение смешанного метода контактных сил и переносных перемещений на класс систем произвольного числа упругих деталей // Изв. ВУЗ. Машиностроение.1988, – № 10, – С.17-22.

14. Гордеев А.Ф., Захаров П.А., Четвержук Т.И. Идентификация и моделирование деформационных свойств стыков металлорежущих станков // Журнал «Сборка в машиностроении и приборостроении»: Выпуск 11. – М: 2012. – С. 10-16.

15. Гордеев А.Ф, Захаров П.А., Четвержук Т.И. Экспериментальное определение тепловой переходной характеристики гидростатического подшипника.// Научный вестник ТОГУ. – г. Хабаровск, 2013. – Выпуск 2(29) – С. 117-122.

16. Гордеев О.Ф., Полінкевич Р.М., Зубовецька Н.Т., Четвержук Т.І. Вібродіагностика верстата з використанням мереж Байєса.// Наукові нотатки: Міжвузівський збірник.– Луцьк, 2013. – Випуск 40. – С. 62-70.

17. Гордеев О.Ф., Полінкевич Р.М., Четвержук Т.І. Демпфуюча здатність стиків металорізальних верстатів.// Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2013. – Випуск 42. – С. 50-55.

18. Гордеев О.Ф., Полінкевич Р.М., Четвержук Т.І. Структурні схеми гідромеханічних ланцюгів верстатів.// Вісник Севастопольського національного технічного університету. – Севастополь, 2012. – Випуск № 128. – С.45-48.

19. Гордеев О.Ф., Полінкевич Р.М., Четвержук Т.І., Голодюк Р.П. Характеристики і моделювання стиків несучої системи верстата.// Науковий

журнал «Технологічні комплекси». – Луцьк 2014. – Випуск №1(9)2014 – С. 174-179.

20. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І. Безрозбірна діагностика стиків металорізальних верстатів на основі самоподібності деформацій.// Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування». – Донецьк 2014. – Випуск №1(47). – С. 99-105.

21. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І. Вплив деформації стиків на точність обробки наметалорізальних верстатах.// Машиностроение и техносфера XXI века. – Донецьк 2013 – Сборник трудов. Том 1 С. 153-157.

22. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І. Методика визначення точнісної надійності вузлів верстата.// Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» – Луцьк 2014 – Випуск №(1) 2014 – С. 21-27.

23. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І. Самоподібність процесів розвитку деформованості стиків при часовій релаксації і зношенні поверхонь.// Вісник Херсонського НТУ – Херсон 2014 – Випуск 50 – С. 51-56.

24. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І. Теоретичне визначення контактних деформацій і жорсткості стиків металорізальних верстатів.// Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2012. – Випуск 38. С. 45-49.

25. Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие фрактальных шероховатых поверхностей деталей машин: Дис. . канд. техн. наук. – М.: 2009. – 255 с.

26. Гусев И.Т. Экспериментальное определение частот собственных колебаний системы станок – упругое звено – вибратор. Труды МИФИ. 1967.

27. Давиденко В.І. Використання мереж Байєса з прихованими вершинами при математичному моделюванні. – Магістерська дисертація, К:НТУУ “КПІ”, 2010. - С. 184.

28. 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.

29. Демкин М.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 244 с.
30. Детали и механизмы металлорежущих станков. В 2 т. / Под общ. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1968. –Т. 1, 664 с.; Т. 2. – 520 с.
31. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия, – М.: Мир, 1989 – 509 с.
32. Експериментальне визначення поля параметрів низькочастотних коливальних процесів при токарній обробці деталей / В. Б. Струтинський, О. М. Кравець, О. Я. Юрчишин // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Машинобуд. і машинознавство. - 2010. – Вип. 7. – С. 168-176.
33. Элементы теории поверхонь [Текст] : навч. посіб. / В. І. Гуляєв, І. В. Горбунович, Л. В. Гловач ; Нац. трасп. ун-т. – К. : [б. в.], 2011. – 239 с. рис. – Бібліогр.: с. 237-239. – ISBN 978-966-632-149-0
34. Еремин Н.В. Улучшение динамических характеристик фрезерных станков на основе моделирования их несущих систем: 05.03.01. – Нижний Новгород, 2004.
35. Ершов А.А. Влияние контактных характеристик соединений корпусных деталей на показатели статической точности: 05.03.01. – Дис... канд. техн. наук, 2001.
36. Залого О.А. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании / В.А. Залого, Д.В. Криворучко, С.С. Некрасов // Научных журнал "Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского". – Кременчуг. – 2010.-Выпуск 6/2010 (65) часть 1. – с.63-70
37. Згуровский М.З. Методы построения байесовских сетей на основе оценочных функций [Текст] / Михаил Захарович Згуровский, Петр Иванович Бидюк, Александр Николаевич Терентьев. - Кибернетика и системный анализ. – 2008. – № 2. – С. 81-88.

38. И.В. Крагельский И.В., Непомнящий И.Ф., Харач Г.М. Усталостный механизм и краткая методика аналитической оценки величины износа поверхностей трения при скольжении. Изд. АН СССР, 1967.

39. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

40. Исследование и расчет контактной жесткости: Методические рекомендации/ З.М. Левина, В.Л. Назаров, Л.Б. Котляренко, В.Н. Кирсанова М.: ЭНИМС, 1969. – 146 с.

41. Каминская В.В., Равве И.И. Автоматизированные расчеты направляющих скольжения// Автоматизация расчетов и проектирование металлорежущих станков: Сб. науч. тр.- М.: ЭНИМС, 1988, – С. 115-120.

42. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

43. Кирилин Ю.В. Совершенствование несущих систем фрезерных станков на основе их моделирования и расчета: Дис. . д-ра техн. наук. – Ульяновск 2006. – 343 с.

44. Кириченко А. М., Струтинський В. Б. (2010) Просторова жорсткість обладнання з паралельною кінематикою Процеси механічної обробки в машинобудуванні (8). С. 88-98.

45. Кирсанова В.Н. Исследование и расчет касательной податливости плоских стыков // Станки и инструмент, – 1967, – № 7. – с. 22-24.

46. Клягин В.И., Сабиров Ф.С. Типовая система технического обслуживания и ремонта металлорежущего и деревообрабатывающего оборудования. М.: Машиностроение, 1988г. – 672 стр.

47. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Виброакустическая диагностика шпиндельных узлов // СТИН, № 5, 2009, с. 8-12.

48. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Попиков А.Н. Виброакустическая диагностика при твердом течении // Вестник МГТУ «Станкин». 2009, № 1(5), с. 23-29.

49. Конструювання та розрахунок металорізальних верстатів. Курсове проектування : навч. посіб. Ч. 2 / А. О. Малярчук; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця, 2010. – 132 с.

50. Корзаков А.А., Машков Г.А. Моделирование контакта двух случайных профилей шероховатых поверхностей. - Вестник МГТУ «Станкин» №3 (7), 2009, С. 106 – 113.

51. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. – 720 с.

52. Косов М.Г. Моделирование точности технологического оборудования на основе имитационной контактной задачи // Конструкторско-технологическая информатика 2000: Труды IV Междунар. Конгресса: в 2 Т.- М.: изд-во "СТАНКИН", 2000. – т. 2, – С. 297-298.

53. Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Измерение динамических характеристик станков методом импульсного нагружения // Измерительная техника. 2009, № 6, с. 39-41.

54. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчета на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

55. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968, – 480 с.

56. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения: Справочник, – М.: Машиностроение, 1984, – 280 с.

57. Кудинов В.А., Токобаев С.Т. Характеристика смешанного трения при динамическом расчете станка // Станки и инструмент – 1968 – №12. С. 8-10.

58. Кудиш И.И. Контактные задачи теории упругости с учетом шероховатости// Исследование, расчет и автоматизированное проектирование подшипников качения: Сб. науч. тр. ВНИПП, – М.: ВНИПП, 1985, –Вып. 1. –С. 125-142.

59. Ланков А.А. Расчет деформационных характеристик при сжатии твердых шероховатых тел, поверхности которых выполнены в виде сфер // Надежность и долговечность деталей машин: Сб. статей – Калинин: Политехн., ин-т, 1974. – С. 126-132.
60. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин, – М.: Машиностроение, 1971, – 264 с.
61. Мальцев А.И. Алгебраические системы. – М.: Наука, 1970, с. 23-30.
62. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
63. Маслов Г.В. Компьютерный метод построения дискретных динамических моделей машин одного класса // Изв. ВУЗов. Машиностроение. 1996, –№7-9, – С. 13-20.
64. Маслов Г.В. Численный метод решения многоконтактных задач статического расчета несущих конструкций машин / Нижегород. гос. техн. ун - т, – Н. Новгород, 1994, – 22 с.
65. Маслов Г.В., Стерлин А.М., Трубин В.Е. Подсистема САПР для моделирования, статического и динамического анализа станочных систем // Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств: Тез. докл. IV РНТК.-Н. Новгород, 1992. С. 60-61.
66. Мелещенко Н.Г. Конечно-элементный анализ явлений в плоском контакте упругих шероховатых тел под действием нормальных и касательных нагрузок / Центральный научно-исследовательский дизельный институт-Л., 1977, – 18 с.
67. Металорізальні верстати : навч. посіб. / В. М. Бочков, Р. І. Сілін, О. В. Гаврильченко; Нац. ун-т "Львів. політехніка", Хмельниц. нац. ун-т. – Л., 2009. – 268 с.
68. Метод повышения фактической загрузки нового металлорежущего оборудования с ЧПУ на действующих машиностроительных предприятиях / В. А. Контелев, А. Н. Михайлов // Прогресив. технології і системи машинобуд.. – 2012. – Вип. 43. – С. 162-169.

69. Модальный анализ как основной метод получения динамических характеристик машин и механизмов /Г. И. Денисенко, Л. Г. Чистяков // Материалы семинара «Испытания и диагностика машин». – М. – 2007.

70. Модальный анализ: теория и испытания: пер. с англ. /Вард Хейлен, Стефан Ламменс, Пол Сас. – М. : ООО «Новотест», 2010. – 319 с.

71. Моделювання синергетичної інтеграції процесів проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівної продукції виробничо-технічного призначення [Текст] : монографія / В. О. Залога, К. О. Дядюра, О. В. Ющенко ; Сум. держ. ун-т. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – 278 с.

72. Некрасов С.С. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании / В.А. Залога, Д.В. Криворучко, С.С. Некрасов, О.А. Залога // Нові технології в машинобудуванні: Вісник КНУ ім Михайла Остроградського. - Кременчук: КНУ, 2010. – Вып. 6. – С. 63- 70.

73. Ольшевский А.А. Разработка методики решения контактных задач с учетом шероховатости поверхностей. // Молодежи, науч.-техн. конф. техн. вузов центр. России / Тез. докл. Под ред. О.А. Горленко. Брянск, БГТУ, 2000. – С.63-67.

74. Ольшевский А.А., Винник, Л.В., Фридберг А.М. Решение нормальной контактной задачи для шероховатых номинально плоских поверхностей // Динамика и прочность транспортных машин: Сб. науч. тр., Брянск, 2000. –С 102-108.

75. Островский В.И. Влияние способов обработки на контактную жесткость направляющих// Станки и инструмент, 1965. – № 1. – С. 9-11.

76. Подлеснов Ю.П. Применение МКЭ к решению плоских прикладных контактных задач. Дис. канд. техн. наук. –Коломна, 1980. – 141с.

77. Программы для расчета на ЭВМ станочных узлов и механизмов, М.: ННИМАШ, 1980. – 195 с.

78. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.

79. Проников А.С. Управление качеством и надежностью при создании новых моделей машин // Конструкторско-технологическая информатика 2000: Труды IV Междунар. конгресса: В 2 т.- М.: Изд-во "Станкин", 2000, – Т. 2. – С. 113.

80. Пуш А.В. Основные принципы проектирования прецизионных и сверхпрецизионных станков // СТИН, 1999, – № 13, – С. 12 -14.

81. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 320с.

82. Решетов Д.Н., Левина З.М. Демпфирование колебаний в деталях станков. – В кн.: Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. М.: Машгиз, 1958, с. 45-86.

83. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : підручник / В. М. Бочков, Р. І. Сілін, О. В. Гаврильченко; Ін-т інновац. технологій і змісту освіти М-ва освіти і науки України. – Л. : Бескид Біт, 2008. – 448 с.

84. Рудзит Я.А. Исследование нерегулярной шероховатости и процесса контактного взаимодействия поверхностей. Автореф. дисс. . д-ра техн. наук. Л., 1981.

85. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин, – М.: Машиностроение, 1966. –193 с.

86. Рыжов Э.В. Основы расчета стыковых поверхностей деталей машин на контактную жесткость. – М.: Машгиз, 1962. – 144 с.

87. Сабиров Ф.С. Повышение эффективности станков на основе их диагностирования и определения виброустойчивости в рабочем пространстве: Дис. д-ра техн. наук : 05.01.05, М.:, 2009. – 215 с.

88. Сабиров Ф.С., Кочинев Н.А., Козочкин М.П., Хомяков В.С., Суслов Д.Н., Сенькина В.В. Диагностика, моделирование и расчет шпиндельных узлов станков // «Комплект: ИТО». 2009, № 3, С. 52-54

89. Савинов Ю.И. Обслуживание станков по фактическому состоянию. РИТМ, №4, 2011 г., стр. 130-133.
90. Савинов Ю.И. Определение параметров механических систем станков. Станки и инструмент, №10, 2010 г., стр. 8-10.
91. Сальников И.В. Повышение динамического качества металлорежущих станков путем автоматического управления демпфированием в стыках упругой системы: ил РГБ ОД 61:85-5/3747.
92. Санкин Ю.Н. Динамика несущих систем металлорежущих станков, – М.: Машиностроение, 1986. – 95 с.
93. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. А.А. Шестакова, – М.: Мир, 1979. – 392 с.
94. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машгиз, 1955. – 420 с.
95. Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів при самоорганізації процесів проектування, виготовлення та експлуатації [Текст] : монографія / В. О. Залого, К. О. Дядюра, В. В. Нагорний ; Сум. держ. ун-т. – Суми : Сум. держ. ун-т, 2012. – 346 с.
96. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів і систем. Підручник. / В.Б. Струтинський, А.М. Гуржій, В.С. Кривцов. Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2011. – 672 с.
97. Струтинський В.Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах: Монографія. / В.Б.Струтинський, В.М.Дрозденко. Київ.: Основа-Принт, 2010. – 440с.
98. Струтинський С.В., Кропівна А. Аналіз процесів технологічних систем: навч. посібник / С.В. Струтинський, А. Кропівна. – Кіровоград: КОД, 2010. – 428 с.
99. Суслов В.И., Ибрагимов Н.М., Талышева Л.П., Цыплаков А.А. Эконометрия. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 744 с.
100. Тарасов И.В. Оценка контактных характеристик направляющих станков: Автореф. дис. . канд. техн. наук. –М., 1993, – 16 с.

101. Теннер О.Г. Влияние погрешностей изготовления направляющих скольжения на контактную жесткость // Станки и инструмент. – 1968, № 3, – С. 1-3.
102. Теорія технічних систем: підручник / Ю. М. Кузнецов, Ю. К. Новосьолов, І. В. Луців; Севастоп. нац. техн. ун-т, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Севастополь, 2011. – 245 с.
103. Технологическая надежность станков. Под общей ред А.С. Пронникова. – М.: Машиностроение, 1971. – 344 с.
104. Технологічні основи виготовлення напівкруглих канавок елементів з'єднань / Б. М. Гевко, В. О. Дзюра, О. Я. Гурик, В. В. Крук. – Т. : Крок, 2011. – 173 с.
105. Технологія моделювання динамічних процесів та систем [Текст] : монографія / В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська ; Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – Вінниця : О.Власюк, 2007. – 466 с.
106. Утенков В.М. Математическое моделирование процесса изнашивания направляющих скольжения металлорежущих станков // Наука и образование: Эл № ФС77 – 48211, – 2013.
107. Утенков В.М. Прогнозирование потери точности металлорежущих станков с направляющими скольжения : 05. 03. 01 : дис... дтн / Утенков В. М. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М., 1995. - 327 л. : ил. – Библиогр.: л. С. 200-223.
108. Утенков В.М. Моделирование износа направляющих скольжения металлорежущих станков // Конструкторско-технологическая информатика 2000: Труды IV Междунар. конгресса: В 2 т.- М.: Изд-во "Станкин", 2000. – Т. 2. – С. 226-229.
109. Утенков В.М. Моделирование процесса изнашивания направляющих пар трения скольжения // Надежность и техническая

диагностика оборудования перерабатывающих отраслей АПК: Сб. научн. работ / Под ред. Т.В. Чижиковой. – М.: Полиграфсервис, 1995, – С. 105-114.

110. Утенков В.М. Разработка прикладного программного обеспечения для моделирования процесса изменения формы направляющих пар трения скольжения при износе // Трение и износ, 1998, – Т. 19, №2. – С. 213-217.

111. Хомяков В.С. Идентификация упругих систем станков на основе модального анализа / В. С. Хомяков, С. И. Досько, Цзои Лю // Станки и инструмент, 1988. – № 7. – С 11-14.

112. Хомяков В.С. Расчет динамических характеристик станков // Металлорежущие станки / Под ред. В.Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1986, – С. 357-376.

113. Четвержук Т.І. Вплив якості поверхневого шару на експлуатаційні характеристики деталей і вузлів верстатів // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. Випуск 43. – Луцьк, 2013. – С. 241-244.

114. Чихладзе Г. Е. Контактная жесткость и стыковое сближение деталей станков. – Тбилиси: Изд-во ун-та, 1986. – 231 с.

115. Чихладзе Т.Е. Экспериментальное исследование влияния масштаба основных факторов на нормальную контактную жесткость.: Дис. . д-ра техн. наук, – Тбилиси, 1973. – 707 с.

116. Чуприна В. М. Порівняльний розрахунок динамічних характеристик шпиндельного вузла верстату 16К20Ф3 в САПР / В. М. Чуприна, М. А. Дмитренко, С. В. Лоскутов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 37. – С. 105-116.

117. Швенгер Г., Берчински С., Бедункевич В. Автоматизированные расчеты направляющих металлорежущих станков // Станки и инструмент, 1988. – №4. С. 16-18.

118. Шевелева Т.Н. Теория формообразования и контакта движущихся тел, –М.: Изд-во "Станкин", 1999. – 494 с.

119. Chan S.K., Tuba J.S. A Finite Element Method for Contact Problems of Solid Bodies.- Pergamon Press, 1971. – Part 1. Theory and Validation "International Journal of Mechanical Sciences". – vol. 13, № 7– P. 213-230.

120. Yoshimura M. Design optimisation of machine tool structure with respect to dynamic characteristics // Trans, of the ASME. – 1983, – V. 105, –№ 1, – P. 88-96.

121. Satoshi O. Finite Element Analysis of Elastic Contact Problems // Bulletin of JSME, 1973. – vol. 16, № 95 – P. 81-95.

122. Tsuda T., Yamaji S. Finite Element Analysis of Contact Problem // Theory and Practice in Finite Elements Structural Analysis.- Tokyo, 1973.- №7,- P. 22-37.

ДОДАТОК А

Програма DefStyk моделювання деформацій стиків

А.1. Інтерфейс програми DefStyk

Реалізація програми моделювання починається із головного вікна, яке містить меню вибору операцій та відповідні вкладки, що допомагають досліднику зробити правильний вибір (рис. А.1).

Меню програми містить шість вкладок (рис. А.1): «Головна», «Аналіз деформацій», «Аналіз стиків», «Мінімізація», «Подобие» та «Протокол». Вкладка «Аналіз стиків» знаходиться у розробці.

А.1.1. Вкладка «Головна»

Основна функція головної вкладки (див. рис. А.1) – забезпечення отримання вхідних даних для здійснення процесу моделювання.

В верхній лівій частині головного вікна (вкладка «Головна») вводяться кількість стиків до бази, кількість точок даних дискретного ряду даних та крок навантаження.

У вікні «Врахування чинників навантаження» вказуються силові чинники, які враховуються при моделюванні.

У вікні «Контроль введення даних» виводяться для візуального контролю введені для моделювання дані. Формат введення даних наводиться у п. А.2.

Програма дозволяє виводити схему (див. рис. А.3) пружної системи (ПС) і фото установки.

A.1.2. Вкладка «Аналіз деформацій»

У вікні вкладки «Аналіз деформацій» (рис. А.2) відображаються таблиці уведених і оброблених даних. Тут у таблицях позначено;

Y_{et} - ряд еталонних віджимань у точці навантаження;

Y_{vum} - ряд вимірних віджимань у точці навантаження;

Y_{etr} – ряд еталонних віджимань у точці навантаження по регресії;

Y_{ras} – ряд розрахункових віджимань у точці навантаження.

На графіку «Деформації: у зоні навантаження ...» деформації можуть показуватися від бази, або власні по вибору. Номер пружного елемента на графіку обирається клацанням на відповідному рядку однієї з трьох нижніх таблиць. Клацанням на кнопки «Власні деформації Y_{se} елементів ПС для еталону» виводиться окреме вікно «Дослідження деформації ПЕ», в якому можна вибрати:

- деформації власні, або при випробуванні;
- вид силового фактора – № точки, або чинник, наприклад сила;
- ступені (порядки) представлення поліномами Y_{si} і Y_{vi}, де і – номер пружного елемента ПЕ_і у таблицях (див. рис. А.1), ці значення зберігаються для подальшого аналізу.

У таблиці цього вікна виводяться коефіцієнти регресії і середнє квадратичне значення адекватності лінії регресії відносно вихідної кривої.

Графіки по номеру обраної кривої і її регресії виводяться клацанням по відповідному рядку таблиці.

A.1.3. Вкладка «Мінімізація»

Дії на вкладці «Мінімізація» (рис. А.5) призначені для підбору коефіцієнтів регресії c_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) поліномів кожної із k -ої функції

подібності $R_k^n(p)$ при ідентифікації деформованих діаграм «НД» в функції (3.8, див. п. 3.2)

$$W_i = \sum_{r=1}^R \left[\sum_{i=1}^I (c_{li}^{(0)} + c_{li}^{(1)}r + c_{li}^{(2)}r^2) \cdot y_{li}^p(p_{li}) - y_{li}(p_{li}) \right]^2 \rightarrow \min_{c_{li}^{(\zeta)}}; c_{li}^{(\zeta)} \in D_{li}; l = \overline{1, L}.$$

У таблиці «Коефіцієнти регресії деформацій по стиках ПЕ» наводяться розрахункові значення коефіцієнтів $\mathbf{c}_{kj}^{(\zeta)} = (c_{li}^{(0)}, c_{li}^{(1)}, c_{li}^{(2)}); l = \overline{1, L}; i = \overline{1, I}$ з

допустимої області $D_i = \left\{ \mathbf{c}_{li}^{(\zeta)} \in E^{3L} : C_{li}^{(\zeta)-} \leq C_{li}^{(\zeta)} \leq C_{li}^{(\zeta)+}; l = \overline{1, L}; \zeta = \overline{0, 2} \right\}$ (3.9, див. п. 3.2).

Параметр Корп в цієї таблиці означає: 1 – якщо відповідний коефіцієнт оптимізується, 0 – якщо ні. При оптимізації використовується метод комплексів, параметри якого задаються у зоні «Параметри методу комплексів». Поточні результати мінімізації виводяться в зоні, яка розташована у лівому нижньому куту вкладці. Корекція границь коефіцієнтів регресії $C_{li}^{(\zeta)-}$ і $C_{li}^{(\zeta)+}$ може проводитися автоматично клацанням по кнопці «Корекція обмежень».

Для візуального контролю збіг експериментальної і розрахункової результуючих кривих показується на графіку, де приводиться також середнє – квадратичне значення адекватності їх збігу.

А.1.4. Вкладка «Подобие»

На вкладці «Подобие» (рис. А.6) виконуються дії по перевірці припущення по подібність розвитку процесу деформованості стику у часі. Ця вкладка має самостійний характер і не пов'язана з іншими, окрім «Головної». На вкладці перевіряється ступінь подібності окремих деформаційних процесів до еталонного. Еталонний процес задається у вихідних даних Yet (див. табл. Str_s, рис. А.2).

На вкладці задаються:

- порядок (ступінь) поліномів регресії кривих ПЕ1...ПЕ n ;

- порядок (ступінь) поліномів регресії функцій подібності $R_k^n(p)$;
- спосіб завдання кривих ПЕ1...ПЕ n – по точках, або по регресії.

Коефіцієнти поліномів функцій $R_k^n(p)$ виводяться у таблиці «Коефіцієнти регресії для умов ПЕ i від еталону ПЕ1». Для порівняння значень вихідних (табл. Str_Ygrp) та точки ідентифікованих кривих виводяться у нижньої таблиці Str_Ygrp. Для візуального порівняння виводяться також графіки еталонної та обраної кривих і їх регресії.

Отримана інформація може бути запротокольована.

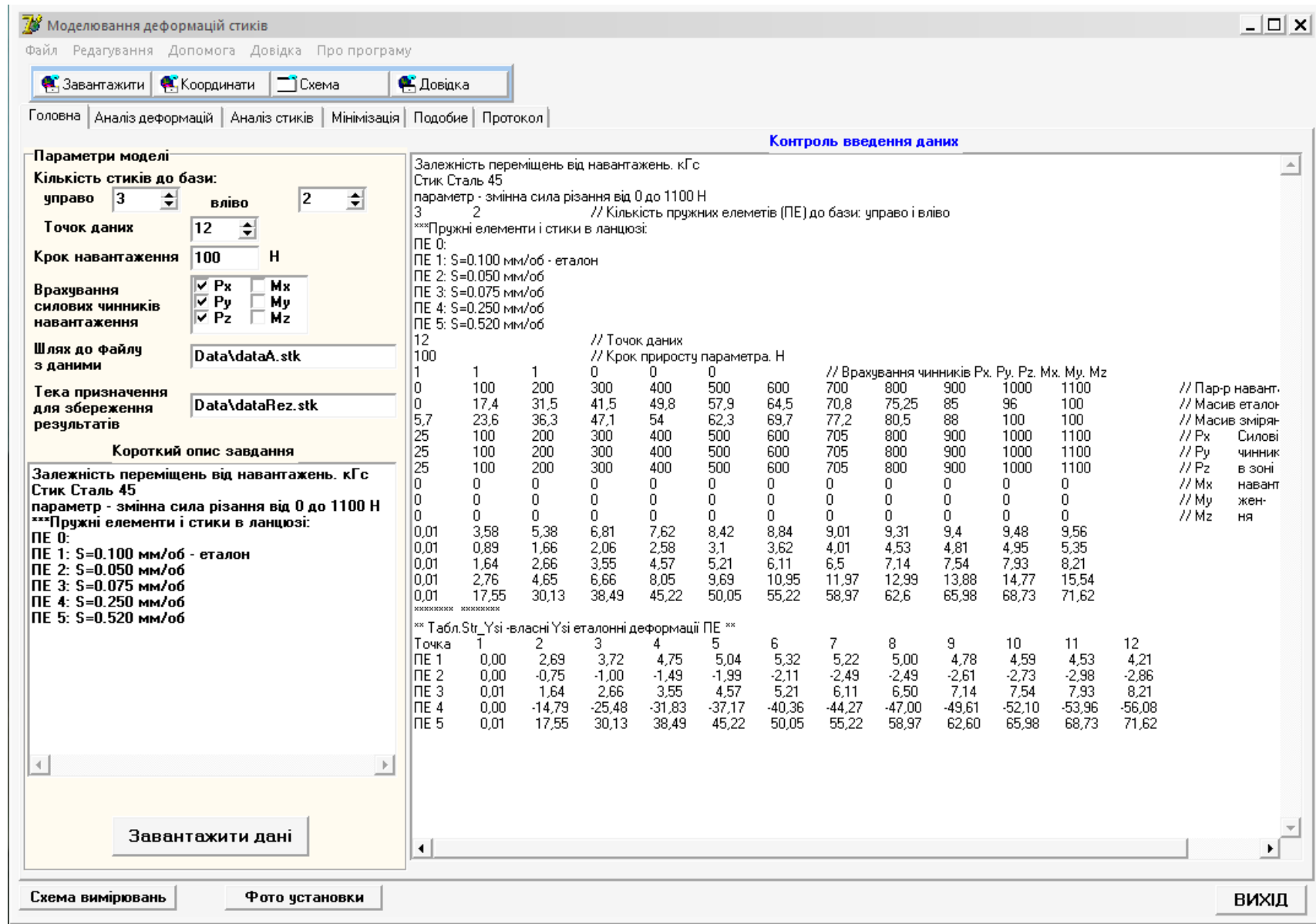


Рис. А.1. Головне вікно програми DefStyk

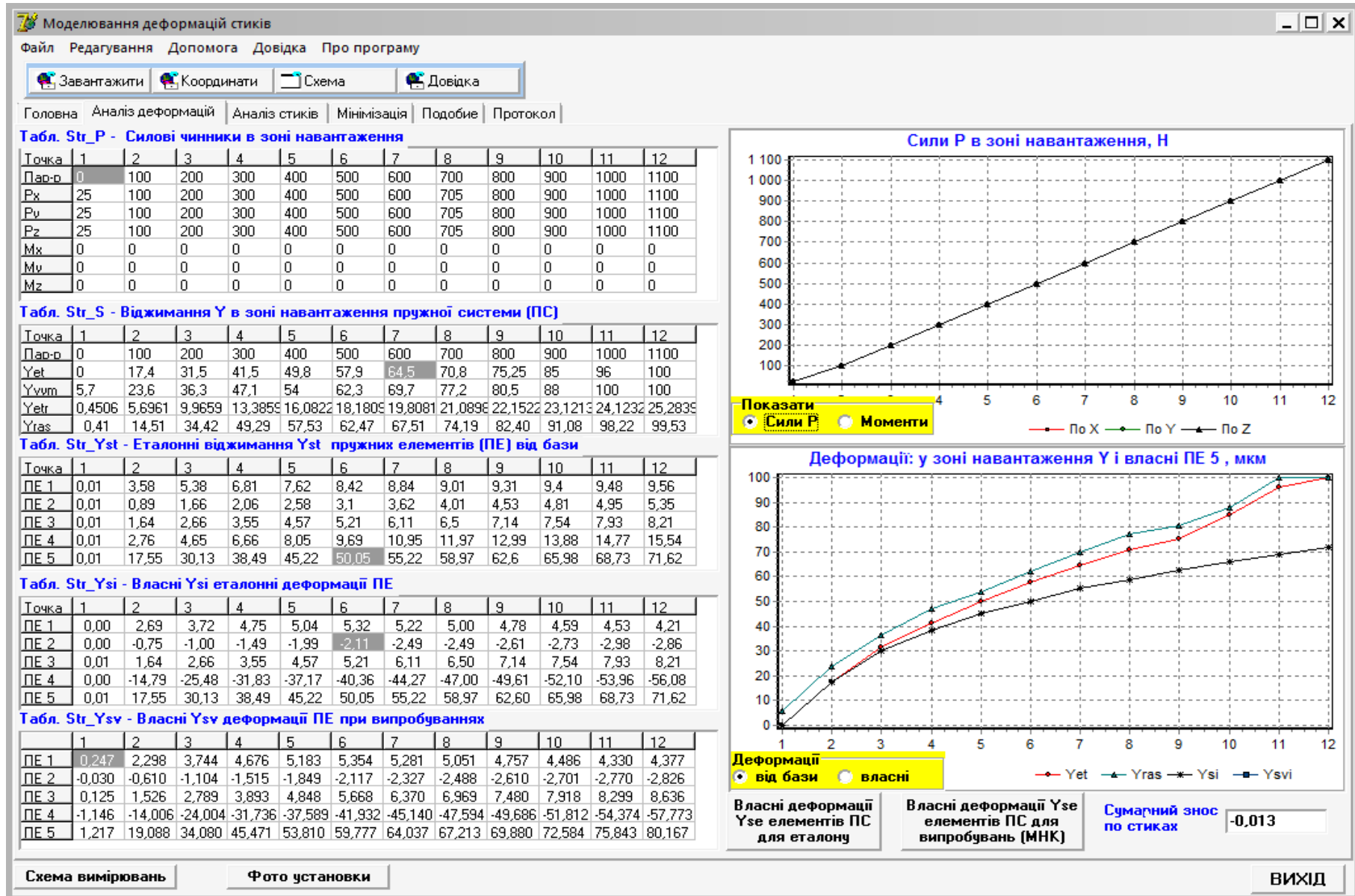


Рис. А.2. Вікно «Аналіз деформацій» програми DefStyk

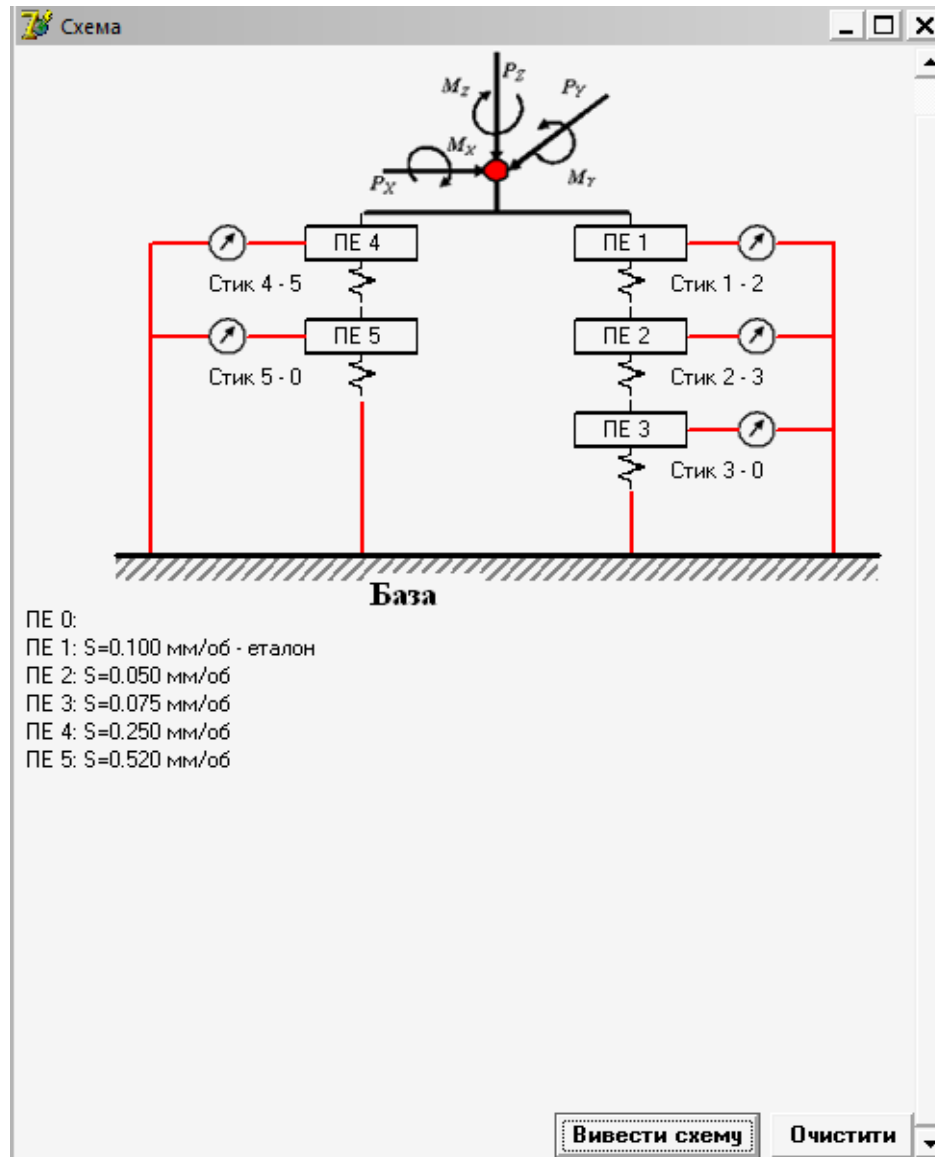


Рис. А.3. Вікно «Схема» програми DefStyk

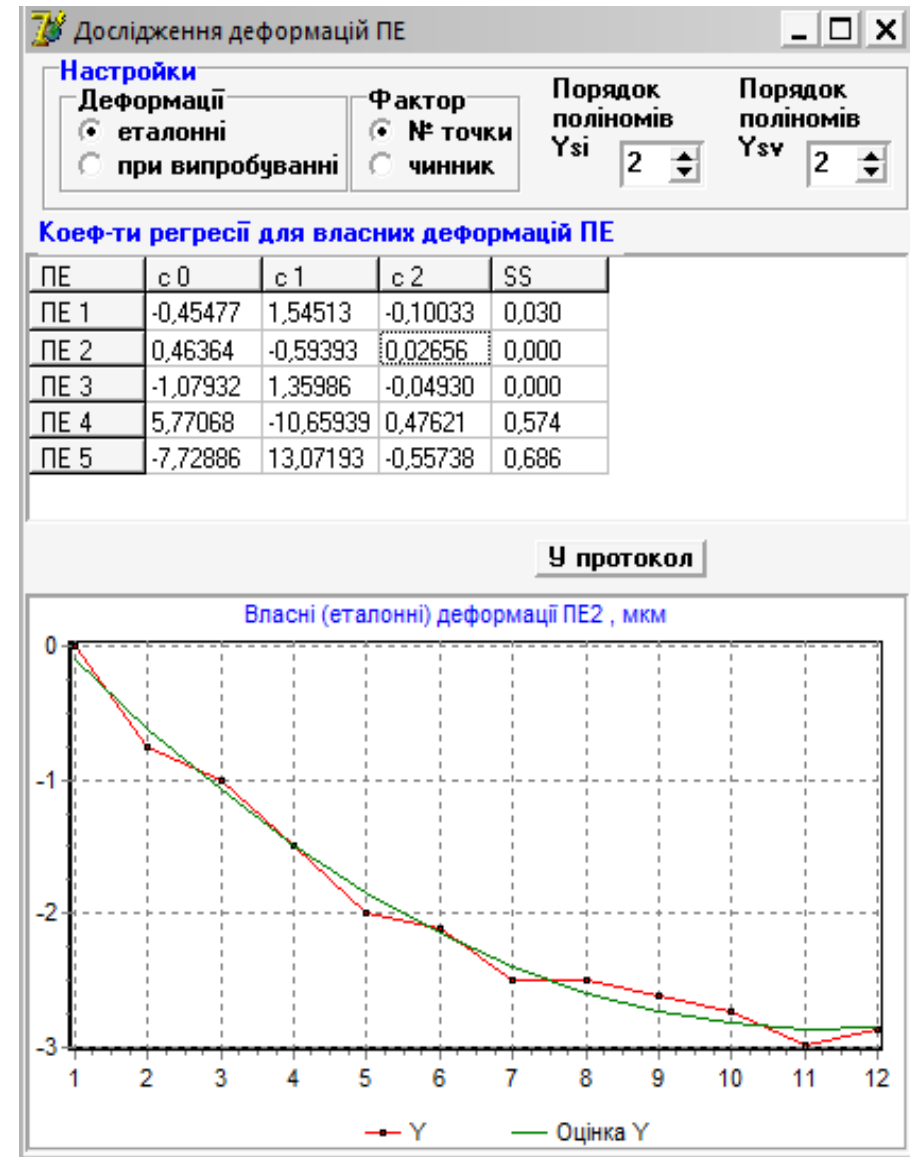


Рис. А.4. Вікно «Дослідження деформації ПЕі» програми DefStyk

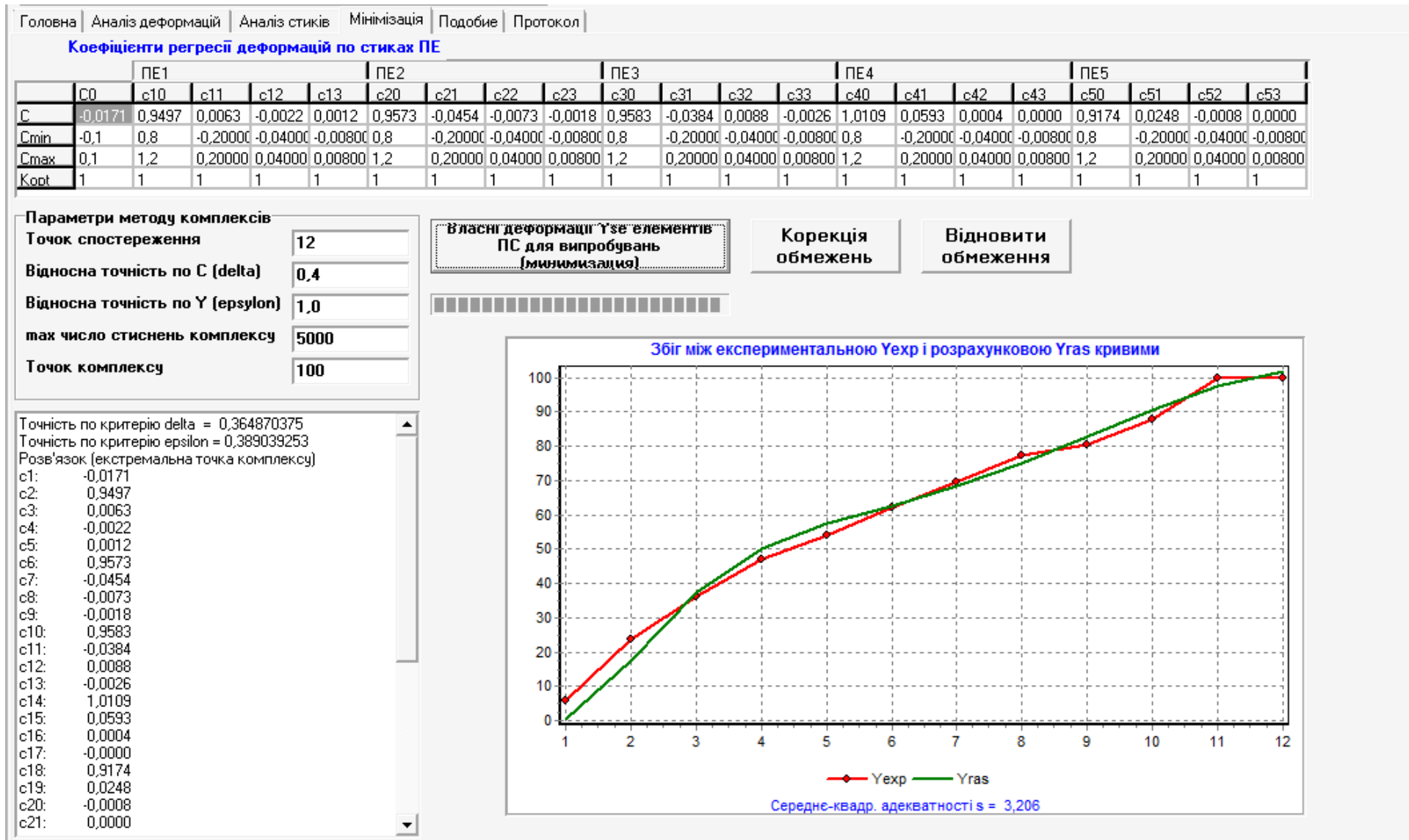


Рис. А.5. Вікно «Мінімізація» програми DefStyk

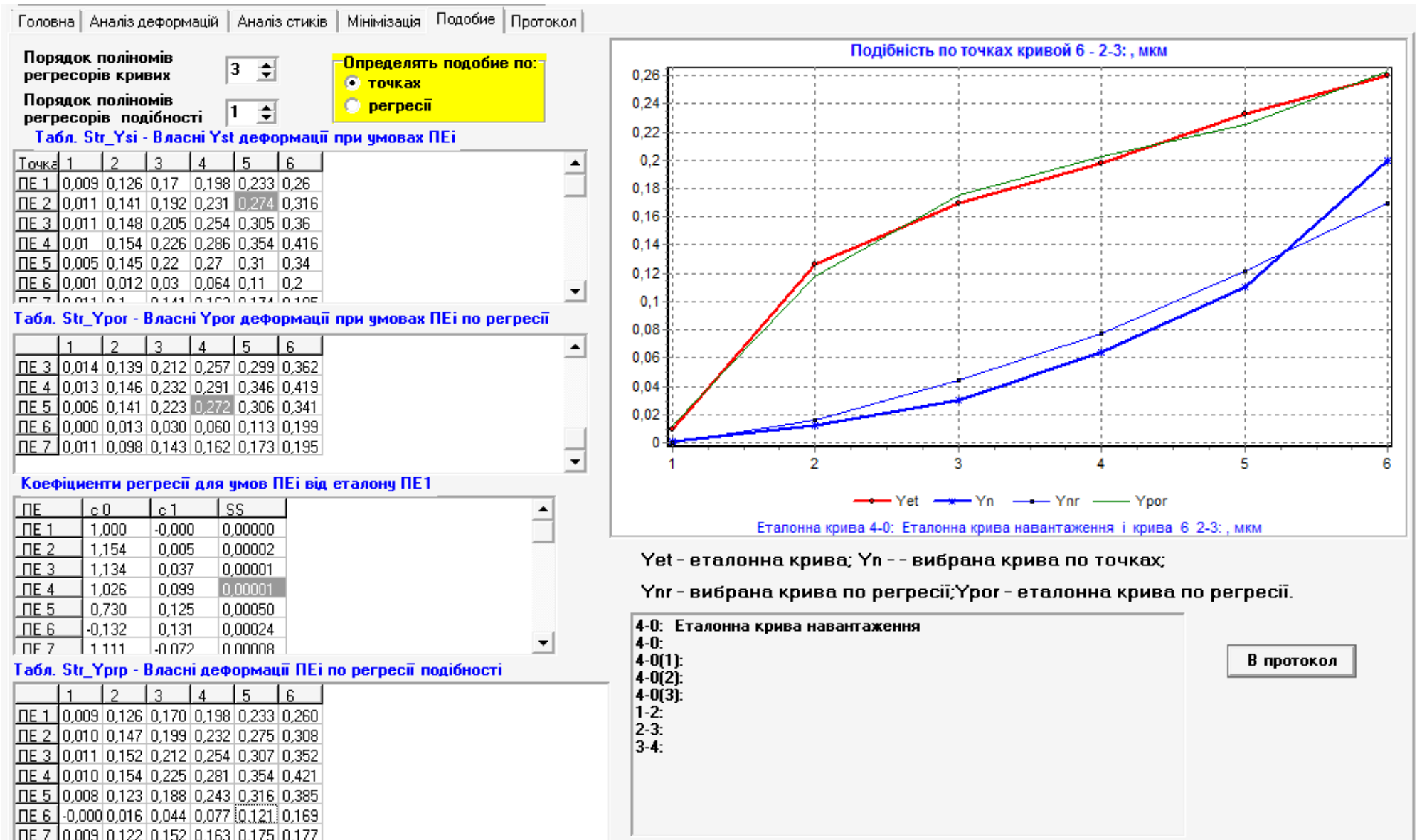


Рис. А.6. Вікно «Подобие» програми DefStyk

А.2. Файл уведення вихідних даних *.stk

Залежність переміщень від навантажень. кГс

Стик Сталь 45

параметр - змінна сила різання від 0 до 1100 Н

// Роздільник 1

3 2 // Кількість пружних елементів (ПЕ) до бази: управо і вліво

// Роздільник 2

ПЕ 0:

ПЕ 1: S=0.100 мм/об - еталон

ПЕ 2: S=0.050 мм/об

ПЕ 3: S=0.075 мм/об

ПЕ 4: S=0.250 мм/об

ПЕ 5: S=0.520 мм/об

// Роздільник 3

12 // Точок даних

100 // Крок приросту параметра. Н

1 1 1 0 0 0 // Врахування чинників P_x. P_y. P_z. M_x. M_y. M_z

0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 // Пар-р навантаження

0 17.4 31.5 41.5 49.8 57.9 64.5 70.8 75.25 85 96 100 // Масив еталонних віджимів

5.7 23.6 36.3 47.1 54.0 62.3 69.7 77.2 80.5 88 100 100 // Масив зміряних віджимів

25 100 200 300 400 500 600 705 800 900 1000 1100 // P_x Силіві

25 100 200 300 400 500 600 705 800 900 1000 1100 // P_y чинники

25 100 200 300 400 500 600 705 800 900 1000 1100 // P_z в зоні

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 // M_x наванта-

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 // M_y жен-

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 // M_z ня

0.01 3.58 5.38 6.81 7.62 8.42 8.84 9.01 9.31 9.40 9.48 9.56 // ПЕ 1

0.01 0.89 1.66 2.06 2.58 3.10 3.62 4.01 4.53 4.81 4.95 5.35 // ПЕ 2

0.01 1.64 2.66 3.55 4.57 5.21 6.11 6.5 7.14 7.54 7.93 8.21 // ПЕ 3

0.01 2.76 4.65 6.66 8.05 9.69 10.95 11.97 12.99 13.88 14.77 15.54 // ПЕ 4

0.01 17.55 30.13 38.49 45.22 50.05 55.22 58.97 62.6 65.98 68.73 71.62 // ПЕ 5

Додаток Б

Програма STYK оцінки локальних зміщень \hat{y}_{it} в стиках

A.1. Головний модуль HeadStyk

```

unit HeadStyk;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart, ComCtrls, Grids,
  MinKomplex, HelpModul, ActnList, StdActns, ExtActns, Spin, CheckLst;
type iGkr=array [1..9] of real;
Type T_R=Array of byte;
Type T_YR=Array[1..10,1..7] of real;
Const Gkr:iGkr=(0.6385,0.4775,0.4027,0.3584,0.3286,0.3067,0.2901,0.2768,0.2659);
type
  TForm1 = class(TForm)
    Timer1: TTimer; Bevel1: TBevel; Panel1: TPanel;
    PageControl1: TPageControl;
    RadioGroup1: TRadioGroup; RadioGroup2: TRadioGroup;
    RadioGroup3: TRadioGroup; RadioGroup4: TRadioGroup;
    RadioGroup5: TRadioGroup; RadioGroup6: TRadioGroup;
    Label11: TLabel; Label21: TLabel; Label22: TLabel; Label17: TLabel; Label18: TLabel;
    Label1: TLabel; Label14: TLabel; Label23: TLabel; Label24: TLabel;
    ScrollBox1: TScrollBox;
    Label4: TLabel; Label6: TLabel; Label7: TLabel; Label8: TLabel; Label9: TLabel;
    Label10: TLabel; Label12: TLabel; Label5: TLabel; Label19: TLabel; Label20: TLabel;
    Label3: TLabel; Label2: TLabel; Label13: TLabel; Label15: TLabel; Label16: TLabel;
    StringGrid1: TStringGrid; StringGrid2: TStringGrid; StringGrid12: TStringGrid;
    Edit5: TEdit; Edit6: TEdit; Edit3: TEdit; Edit7: TEdit; Edit8: TEdit; Edit10: TEdit;
    Edit9: TEdit; Edit11: TEdit; Edit15: TEdit; Edit16: TEdit; Edit13: TEdit; Edit14: TEdit;
    Edit17: TEdit; Edit18: TEdit; Edit4: TEdit; Edit1: TEdit; Edit12: TEdit; Edit19: TEdit;
    Edit20: TEdit; Edit22: TEdit; Edit21: TEdit; Edit2: TEdit;
    StringGrid4: TStringGrid; StringGrid5: TStringGrid; StringGrid6: TStringGrid;
    StringGrid3: TStringGrid; StringGrid8: TStringGrid; StringGrid9: TStringGrid;
    StringGrid10: TStringGrid; StringGrid11: TStringGrid; StringGrid7: TStringGrid;
    Memo1: TMemo; Memo6: TMemo;
    Button1: TButton; Button2: TButton; Button5: TButton; Button6: TButton;
    Button14: TButton; Button4: TButton; Button7: TButton; Button15: TButton;
    Button9: TButton; Button11: TButton; Button12: TButton; Button10: TButton;
    Button16: TButton; Button17: TButton; Button18: TButton; Button19: TButton;
    Button21: TButton; Button13: TButton; Button22: TButton; Button3: TButton;
    Button24: TButton; Button25: TButton; Button26: TButton; Button27: TButton;
    Button28: TButton; Button20: TButton; Button8: TButton;
    TrackBar1: TTrackBar;
    UpDown1: TUpDown; UpDown2: TUpDown;
    Chart3: TChart; Chart4: TChart; Chart1: TChart; Chart5: TChart; Chart2: TChart;
    Series7: TLineSeries; Series8: TLineSeries; Series11: TLineSeries;
    StaticText3: TStaticText; StaticText4: TStaticText; StaticText2: TStaticText;
    StaticText5: TStaticText; StaticText6: TStaticText; StaticText7: TStaticText;
  end;
end.

```

```

StaticText10: TStaticText; StaticText9: TStaticText; StaticText1: TStaticText;
StaticText8: TStaticText; StaticText11: TStaticText;
TabSheet6: TTabSheet; TabSheet8: TTabSheet; TabSheet3: TTabSheet;
TabSheet5: TTabSheet; TabSheet7: TTabSheet; TabSheet4: TTabSheet;
TabSheet1: TTabSheet; TabSheet2: TTabSheet;
Memo2: TMemo; Memo3: TMemo; Memo4: TMemo;
ActionList1: TActionList; FileRun1: TFileRun;
LineSeries1: TLineSeries; LineSeries2: TLineSeries; LineSeries3: TLineSeries;
Series12: TLineSeries; Series13: TLineSeries; Series14: TLineSeries;
Series15: TLineSeries; Series9: TLineSeries; Series10: TLineSeries;
Series4: TLineSeries; Series5: TLineSeries; Series6: TLineSeries;
Series1: TLineSeries; Series2: TLineSeries; Series3: TLineSeries;
RadioGroup7: TRadioGroup; RadioGroup8: TRadioGroup;
SpinEdit2: TSpinEdit; SpinEdit3: TSpinEdit; SpinEdit1: TSpinEdit;
CheckListBox1: TCheckListBox;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject);
procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
procedure Button11Click(Sender: TObject);
procedure Button12Click(Sender: TObject);
procedure UpDown2Changing(Sender: TObject; var AllowChange: Boolean);
procedure Button13Click(Sender: TObject);
procedure Edit15Change(Sender: TObject);
procedure Edit16Change(Sender: TObject);
procedure TabSheet4Show(Sender: TObject);
procedure Button14Click(Sender: TObject);
procedure Edit14Change(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure TrackBar1Enter(Sender: TObject);
procedure Button16Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure Button17Click(Sender: TObject);
procedure Button15Click(Sender: TObject);
procedure SpinEdit1Change(Sender: TObject);
procedure TabSheet8Show(Sender: TObject);
procedure Button24Click(Sender: TObject);
procedure RadioGroup8Click(Sender: TObject);
procedure SpinEdit3Change(Sender: TObject);
procedure CheckListBox1Click(Sender: TObject);
procedure Button26Click(Sender: TObject);
procedure Button27Click(Sender: TObject);
procedure Button28Click(Sender: TObject);
procedure Button20Click(Sender: TObject);
end;
var

```

```

Form1: TForm1;
nSres,Start,nnn,cc:word;
Mod1,Mod2,Mod3,Mod4:Tar1_ex;
AllowChange, Znach: Boolean;
YR:T_YR;
ATur:T_AX;
Koh:Tar1_ex;
mC:TarC; //Array [1..nMod+1, 1.. nA, 1.. nC] of real
sad:real;
nMod:byte; // Счетчик числа моделирований
Sh8:byte=0;
A:Array[1..3,1..12,1..7] of real; // X, r, A
B:Array[1..12,1..7] of real; // r, A
function StrToReal(S:String):Real;
procedure StrinGrid2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);

```

```

implementation
{$R *.DFM}

```

```

procedure SGrid6(i,j,k,l:byte);
var GRect:TGridRect;
begin
GRect.Left:=i;
GRect.Top:=j;
GRect.Right:=k;
GRect.Bottom:=l;
Form1.StringGrid6.Selection:=GRect;
end;

```

```

procedure StrinGrid2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key in ['0'..'9'] then Exit;
if Key = ';' then
begin
Key:=',';
Exit;
end;
if Key in [#13,#8,']'] then Exit;
Key:=#0;
end;
function StrToReal;
label 1;
var
s1,s2:string;
a:set of char;
i,m:integer;
n:boolean;
minus:boolean;
begin
if s="" then s:='0';
if s[1]='-' then minus:=true else Minus:=false;
result:=0;

```

```

a:=['1','2','3','4','5','6','7','8','9','0',',','.'];
1:
n:=false;
for i:=1 to length(s) do
begin
if s[i]='.' then s[i]:='.';
if (s[i]='.') then
begin
if n then begin Delete(s,i,1);goto 1;end;
n:=true;
end;
if not(s[i]in a) then begin Delete(s,i,1);goto 1;end;
end;
if s="" then s:='0';
s1:="";
s2:="";
if pos('.',s)<>0 then
for i:=1 to length(s) do
begin
if i<pos('.',s) then s1:=s1+s[i];
if i>pos('.',s) then s2:=s2+s[i];
end;
if pos('.',s)=0 then s1:=s;
repeat
Delete(s1,pos('.',s1),1);
until pos('.',s1)=0;
repeat
Delete(s2,pos('.',s2),1);
until pos('.',s2)=0;
if s1="" then s1:='0';
if s2="" then s2:='0';
m:=10;
for i:=2 to length(s2) do
begin
m:=m*10;
end;
s:=s1;
if length(s1)>8 then
begin
s1:="";
for i:=1 to 8 do
s1:=s1+s[i];
end;
s:=s2;
if length(s2)>8 then
begin
s2:="";
for i:=1 to 8 do
s2:=s2+s[i];
end;
Result:=StrToInt64(s1)+StrToInt64(s2)/m;
if minus then Result:=-Result;

```

```

end;
// Start
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var i:byte;
begin
  TabSheet2.Show;
  nnn:=nnn+1;
  Start:=99;
  nToch:=StrToInt(Edit5.Text);
  stepT:=StrToFloat(Edit6.Text);
  delta:=StrToFloat(Edit3.Text);
  epsilon:=StrToFloat(Edit7.Text);
  mxv:=StrToInt(Edit8.Text);
  TrackBar1.Min:=0; TrackBar1.Max:=mxv;
  My;
  Form1.Memo1.Lines.Add('Start*** = '+IntToStr(nnn));
  for i:=1 to nC do begin
    X[i]:= StrToFloat(StringGrid2.Cells[1,i]);
    X1[i]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[2,i]);
    X2[i]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[3,i]);
    KX[i]:=StrToInt(StringGrid2.Cells[4,i]);
  end;
  Button2.Enabled:=true; Button5.Enabled:=true;
  if Contr0(StrToInt(Edit14.Text))=true then
    begin
      ShowMessage(' Строка '+Edit14.Text+'- нулевая - пропущена');
      Form1.Button14Click(Sender);
    end;
end;

// Draw
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
  i:integer;
  Ws,Delt,s,ss,Srq:real;
begin
  TabSheet1.Show;
  ws:=0; s:=0;
  Y:=0;
  for i:=1 to nC do StringGrid2.Cells[1,i]:=Format('%.8f',[x[i]]);
  Series1.Clear;
  Series2.Clear;
  Series3.Clear;
  Series4.Clear;
  Series5.Clear;
  Series6.Clear;
  for i:=1 to nToch do begin
    Mod1[i]:=Tochka(1,i,Br,Tur[1,i],X[1],X[4],X[7]);
    Mod2[i]:=Tochka(2,i,Br,Tur[2,i],X[2],X[5],X[8]);
    Mod3[i]:=Tochka(3,i,Br,Tur[3,i],X[3],X[6],X[9]);
    Yras[i]:=Mod1[i]+Mod2[i]+Mod3[i];
    YR[i,StrToInt(Edit14.Text)]:=Yras[i];
  end;
end;

```

```

StringGrid8.Cells[StrToInt(Edit14.Text),i]:=Format('%.3f',[Yras[i]]);
Diff[i]:=Yexp[i]-Yras[i];
s:=s+Diff[i];
Ws:=ws+(Yexp[i]-Yras[i])*(Yexp[i]-Yras[i]);
Series1.AddXY(i,YExp[i]);
Series2.AddXY(i,Yras[i]);
Series3.AddXY(i,Diff[i]);
Series4.AddXY(i,Mod1[i]);
Series5.AddXY(i,Mod2[i]);
Series6.AddXY(i,Mod3[i]);
end;
ss:=s/nToch; s:=0;
for i:=1 to nToch do s:=s+(Diff[i]-ss)*(Diff[i]-ss);
ss:=Sredn(nToch,Diff); s:=Disp(nToch,Ss,Diff);
srq:=sqrt(s);
Delt:=2*1.66*srq;
Edit10.Text:=Format('%.3f',[srq]);
Edit2.Text:=Format('%.3f',[Delt]);
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var
  DateTime:TDateTime;
  i,j:word;
  s:string;
begin
cc:=0; Znach:=false; sad:=0;
TabSheet2.Show;
Button2.Enabled:=false;
Start:=0; nMod:=1;
Button16.Caption:='Моделювання '+IntToStr(nMod);
StringGrid2.RowCount:=StrToInt(Edit15.Text)+1;
StringGrid6.RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+2;
StringGrid4.RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+1;
Form1.SpinEdit1Change(Sender);
StringGrid1.Cells[1,0]:=' Y_nom';
StringGrid1.Cells[2,0]:=' Y_min';
StringGrid1.Cells[3,0]:=' Y_max';
StringGrid1.Cells[4,0]:=' v_Y';
StringGrid1.Cells[5,0]:=' k_Y';
StringGrid1.Cells[0,1]:='Yexp';
StringGrid1.Cells[1,1]:='1';
StringGrid1.Cells[2,1]:='0';
StringGrid1.Cells[3,1]:='5';
StringGrid1.Cells[4,1]:='1';
StringGrid1.Cells[5,1]:='1';
StringGrid5.Cells[0,0]:='Сила P'; // X
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do StringGrid5.Cells[0,i]:=' P'+IntToStr(i);
StringGrid6.Cells[0,0]:='Коорд.№'; // A
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do StringGrid6.Cells[0,i]:=' '+IntToStr(i);
StringGrid6.Cells[0,7]:=' Y exp';
for i:=1 to 9 do begin
StringGrid5.Cells[i,0]:=' '+IntToStr(i);

```

```

StringGrid6.Cells[i,0]:= ' '+IntToStr(i);
end;
StringGrid3.Cells[0,0]:='Ki'; //Таблиця виконання задач для факторів Ai
StringGrid3.Cells[1,0]:='Старус';
StringGrid3.RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+1;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do StringGrid3.Cells[0,i]:='K'+IntToStr(i);

with StringGrid12 do begin
Cells[1,0]:='Delta'; Cells[2,0]:='Epsilon';
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Cells[0,i]:='K'+IntToStr(i);
end;

Edit4.Text:='DataFile\KoeffA'+Edit14.Text+'.txt';
StringGrid7.RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+1;
Form1.Button6Click(Sender);
Form1.Button10Click(Sender);
Form1.Button11Click(Sender);
Form1.Button12Click(Sender);
Form1.UpDown2Changing(Sender,AllowChange);
Form1.Button13Click(Sender);
// in protocol
DateTime:=Time;
Memo2.Lines.Add('Протокол *STYK*: '+DateToStr(Date)+' '+TimeToStr(DateTime));
Memo2.Lines.Add("");
Memo2.Lines.Add(Label19.Caption);
for i:=0 to StringGrid5.RowCount-1 do begin
s:="";
for j:=0 to StringGrid5.ColCount-1 do begin
s:=s+StringGrid5.Cells[j,i]+#9;
end;
Memo2.Lines.Add(s);
end;
Memo2.Lines.Add("");
Memo2.Lines.Add(Label20.Caption);
for i:=0 to StringGrid6.RowCount-1 do begin
s:="";
for j:=0 to StringGrid6.ColCount-1 do begin
s:=s+StringGrid6.Cells[j,i]+#9;
end;
Memo2.Lines.Add(s);
end;
Memo2.Lines.Add("");
end;

// Exit
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
Application.Terminate;
end;

// Timer
procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);

```

```

var
DateTime:TDateTime;
begin
DateTime:=Time;
Label13.Caption:=DateToStr(Date)+' '+TimeToStr(DateTime);
end;

// Сохранение результатов
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
var
i:word;
fwr:TextFile;
begin
AssignFile(fwr,Edit9.Text);
{$I-}
ReWrite(fwr);
{$I+}
for i:=1 to nC do begin
X[i]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[1,i]);
X1[i]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[2,i]);
X2[i]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[3,i]);
KX[i]:=StrToInt(StringGrid2.Cells[4,i]);
WriteLn(fwr,X[i]:9:8,#9,X1[i]:9:8,#9,X2[i]:9:8,#9,KX[i]);
end;
CloseFile(fwr);
end;

// Чтение модальных параметров в таблицу
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
var
i:word;
fwr:TextFile;
resR:Byte;
begin
AssignFile(fwr,Edit11.Text);
{$I-}
Reset(fwr);
{$I+}
resR:=IOResult;
If (resR<>0) then begin
ShowMessage('Помилка відкриття файла'+Edit11.Text+' для чтения');
CloseFile (fwr); Exit end;
for i:=1 to nC do begin
ReadLn(fwr,X[i],X1[i],X2[i],KX[i]);
StringGrid2.Cells[1,i]:=ftos(X[i],9,8);StringGrid2.Cells[2,i]:=ftos(X1[i],9,8);
StringGrid2.Cells[3,i]:=ftos(X2[i],8,8);StringGrid2.Cells[4,i]:=IntToStr(KX[i]);
end;
CloseFile(fwr);
AssignFile(fwr,'DataFile\Wron.txt');
Reset(fwr);
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Read(fwr,Delt[i]);
ReadLn(fwr);

```



```

for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Read(fwr,Eps[i]);
i:=StrToInt(Edit14.Text);
Edit3.Text:=Ftos(Delt[i],10,9);
Edit7.Text:=Ftos(Eps[i],10,9);
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
StringGrid12.Cells[1,i]:=Ftos(Delt[i],10,9);
StringGrid12.Cells[2,i]:=Ftos(Eps[i],10,9)
end;
CloseFile(fwr);
end;

// Показать смешанные моды
procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
function z(r:word):integer;
begin
  Case r of
    0: Result:=0;
    1: Result:=1;
    2: Result:=-1;
    else Result:=0
  end;
end;
Var
i:word;
a,b,c,d,e,e1,e2,f1,f2:word;
t:real;
begin
TabSheet7.Show;
e1:=0; e2:=0; f1:=0; f2:=0;
a:=z(RadioGroup1.ItemIndex);
b:=z(RadioGroup2.ItemIndex);
c:=z(RadioGroup3.ItemIndex);
d:=z(RadioGroup4.ItemIndex);
e:=z(RadioGroup5.ItemIndex);
if e=1 then e1:=1;
if e=-1 then e2:=1;
if RadioGroup6.ItemIndex=1 then f1:=1;
if RadioGroup6.ItemIndex=2 then f2:=1;
Series9.Clear;
Series10.Clear;
for i:=1 to nToch do
  begin
    t:=(i-1)*stepT;
    Series9.AddXY(t,a*Mod1[i]+b*Mod2[i]+c*Mod3[i]+d*Mod4[i]
-e1*YExp[i]-e2*Yras[i]);
    Series10.AddXY(t,f1*YExp[i]+f2*Yras[i]);
  end;
end;

//Корректировать ограничения X
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
var

```

```

i:word;
begin
with StringGrid2 do begin
for i:=1 to nC do begin
if kx[i]=0 then Continue;
if StrToFloat(Cells[1,i])<=1.1*StrToFloat(Cells[2,i])
then Cells[2,i]:=ftos(0.8*X[i],9,8);
if StrToFloat(Cells[1,i])>=0.9*StrToFloat(Cells[3,i])
then Cells[3,i]:=ftos(1.2*X[i],9,8);
end;
end;
end;

// Ввести коэф.регрессии из файла <---
procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
var
c,r,resR:byte;
fwr:TextFile;
begin
AssignFile(fwr,'DataFile\KoeffA'+Edit14.Text+'.txt');
{$I-}
Reset(fwr);
{$I+}
resR:=IOResult;
If (resR<>0) then begin
ShowMessage('Помилка відкриття файла'+Edit4.Text+' для чтения');
CloseFile (fwr);Exit end;
for r:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do
StringGrid4.Cells[0,r]:=' Y'+[P'+IntToStr(r)+'(r)'];
for c:=1 to Kregr do StringGrid4.Cells[c,0]:=' B'+IntToStr(c-1);
for r:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do
for c:=1 to Kregr do begin
if c=Kregr then ReadLn(fwr,Br[c,r]) else Read(fwr,Br[c,r]);
StringGrid4.Cells[c,r]:=ftos(Br[c,r],8,5);
end;
CloseFile (fwr)
end;

// Read and write of P - loading
procedure TForm1.Button11Click(Sender: TObject);
var
i,j:word;
fwr:TextFile;
resR:Byte;
begin
AssignFile(fwr,Edit17.Text);
{$I-}
Reset(fwr);
{$I+}
resR:=IOResult;
If (resR<>0) then begin
ShowMessage('Помилка відкриття файла'+Edit17.Text+' для чтения');

```

```

    CloseFile (fwr);Exit end;
for j:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
  for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
    Read(fwr,Tur[i,j]);
    StringGrid5.Cells[j,i]:=FToS(Tur[i,j],6,3);
  end;
ReadLn(fwr);
end;
CloseFile(fwr);
end;

// Read and write of A
procedure TForm1.Button12Click(Sender: TObject);
var
  i,j:word;
  fwr,fwv:TextFile;
  resR:Byte;
  VDV:Tar1_mn;
begin
  AssignFile(fwr,Edit18.Text);
  {$I-}
  Reset(fwr);
  {$I+}
  resR:=IOResult;
  If (resR<>0) then begin
    ShowMessage('Помилка відкриття файла'+Edit18.Text+' для читання');
    CloseFile (fwr);Exit end;
  for j:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
      Read(fwr,ATur[i,j]);
      StringGrid6.Cells[j,i]:=FToS(ATur[i,j],6,3);
    end;
    StringGrid6.Cells[j,7]:=FToS(VDV[j],6,3);
    ReadLn(fwr);
  end;
  CloseFile(fwr);
  // Read of VVP.txt
  AssignFile(fwv,'DataFile\VVP.txt');
  {$I-} Reset(fwv); {$I+}
  resR:=IOResult;
  If (resR<>0) then begin
    ShowMessage('Помилка відкриття файла DataFile\VVP.txt для читання');
    CloseFile (fwv);Exit end;
  for j:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
    ReadLn(fwv,VDV[j]);
    StringGrid6.Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+1]:=FToS(VDV[j],6,3);
  end;
  Vexp[j]:=VDV[j];
  CloseFile(fwv);
  Edit14.Enabled:=true; UpDown2.Enabled:=true;
end;
//Read of Yexp from table

```

```

procedure TForm1.UpDown2Changing(Sender: TObject;var AllowChange: Boolean);
var
i,j:byte;
begin
j:=StrToInt(Edit14.Text);
for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
Yexp[i]:=StrToFloat(StringGrid6.Cells[i,j]);
end;
SGrid6(0,0,0,0);
SGrid6(0,j,StrToInt(Edit5.Text),j);
end;

```

```

procedure TForm1.Button13Click(Sender: TObject);
begin
Form1.UpDown2Changing(Sender,AllowChange);
StringGrid7.RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+1;
Edit4.Text:='DataFile\KoefA'+Edit14.Text+'.txt';
Form1.Button10Click(Sender);
maxY:=Max(StrToInt(Edit5.Text),Yexp);
StringGrid1.Cells[3,1]:=FToS(maxY*2,6,3);
end;

```

```

procedure TForm1.Edit15Change(Sender: TObject);
begin
StringGrid2.RowCount:=StrToInt(Edit15.Text)*SpinEdit1.Value+1;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit16Change(Sender: TObject);
begin
Form1.Button14Click(Sender);
end;

```

```

procedure TForm1.TabSheet4Show(Sender: TObject);
var i:byte;
begin
if cc=0 then exit;
with StringGrid7 do begin
RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+nMod+2;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Cells[0,i]:=' y'+IntToStr(i);
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i,0]:=' C'+IntToStr(i)+'0';
Cells[0,StrToInt(Edit16.Text)+nMod]:=' Мод.'+IntToStr(nMod);
end;
with StringGrid10 do begin
RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+nMod+2;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Cells[0,i]:=' y'+IntToStr(i);
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i,0]:=' C'+IntToStr(i)+'0';
Cells[0,StrToInt(Edit16.Text)+nMod]:=' Мод.'+IntToStr(nMod);
end;
with Form1.StringGrid8 do begin
for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do Cells[0,i]:=' '+IntToStr(i);
RowCount:=StrToInt(Edit5.Text)+1;
ColCount:=StrToInt(Edit16.Text)+4;

```

```

Cells[0,0]:= ' Ki';
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Cells[i,0]:= ' y'+IntToStr(i);
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+2,0]:= 'Y_пачч';
end;
with Form1.StringGrid9 do begin
for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do Cells[0,i]:= ' '+IntToStr(i);
RowCount:=StrToInt(Edit5.Text)+4;
Cells[0,StrToInt(Edit5.Text)+1]:= 'Середне';
Cells[0,StrToInt(Edit5.Text)+2]:= 'Ср.квадр';
Cells[0,StrToInt(Edit5.Text)+3]:= 'G_Кохрена';
Cells[0,0]:= ' Ki';
ColCount:=2*nMod+1;
Cells[2*nMod-1,0]:= ' Y '+IntToStr(nMod);
Cells[2*nMod,0]:= 'delt'+IntToStr(nMod);
end;
end;

// Зберегти
procedure TForm1.Button14Click(Sender: TObject);
var
i,c,r:byte;
fwr:TextFile;
Ready:T_R;
S:string;
begin
Form1.Button5Click(Sender);
r:=StrToInt(Edit14.Text);
Delt[r]:=StrToFloat(Edit3.Text); Eps[r]:=StrToFloat(Edit7.Text);
Form1.Button2Click(Sender); // Рисовать графики
S:='A'+IntToStr(r);
for i:=1 to nC do begin
StringGrid7.Cells[i,r]:=FTos(X[i],8,7);
mC[nMod,r,i]:=X[i]; //Array [1..nMod+1, 1.. nA, 1.. nC] of real
StringGrid10.Cells[i,r]:=StringGrid7.Cells[i,r];
S:=S+#9+FTos(X[i],8,7);
end;
StringGrid3.Cells[1,StrToInt(Edit14.Text)]:= 'Ready';
c:=1;
S:="";
SetLength(Ready,StrToInt(Edit5.Text)+1);
for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
if StringGrid3.Cells[1,i]='Ready' then Ready[i]:=1;
end;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do cc:=c*Ready[i];
if cc=1 then begin
Button14.Caption:='ALL READY!';
Button4.Enabled:=true; Button5.Enabled:=false;
Series7.Clear; Series8.Clear; Series11.Clear;
TabSheet4.Show;
exit
end;
AssignFile(fwr,'DataFile\Wron.txt');

```

```

Rewrite(fwr);
i:=StrToInt(Edit14.Text);
Delt[i]:=StrToFloat(Edit3.Text);
Eps[i]:=StrToFloat(Edit7.Text);
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Write(fwr,Delt[i]:10:9,#9,#9);
WriteLn(fwr);
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do Write(fwr,Eps[i]:10:9,#9,#9);
CloseFile(fwr);
Edit14.Text:=IntToStr(StrToInt(Edit14.Text)+1);
if StrToInt(Edit14.Text)<=StrToInt(Edit16.Text) then begin
Edit11.Text:='DataFile\Moda'+IntToStr(StrToInt(Edit14.Text))+'.txt';
Edit9.Text:='DataFile\Moda'+IntToStr(StrToInt(Edit14.Text))+'.txt';
Form1.Button6Click(Sender)
end;
TabSheet2.Show;
end;

procedure TForm1.Edit14Change(Sender: TObject);
begin
Form1.Button13Click(Sender);
end;

// Вивестія графіки
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
var
i,j,r:word;
fwr:TextFile;
resR:Byte;
Delt,s,ss,srq,G:real;
csum:Tar1_ex;
begin
Series7.Clear; Series8.Clear; Series11.Clear;
AssignFile(fwr,'DataFile\VVP.txt');
{$I-}
Reset(fwr);
{$I+}
resR:=IOResult;
If (resR<>0) then begin
ShowMessage('Помилка відкриття файла VVP.txt для читання');
CloseFile (fwr);Exit end;
with Form1.StringGrid8 do begin // Результати розрахунку і порівняння
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+1,0]:=' Y_експ';
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+2,0]:=' Y_расч'+IntToStr(nMod);
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+3,0]:='екс-расч'+IntToStr(nMod);
for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
ReadLn(fwr,Vexp[i]);
Series7.AddXY(i,Vexp[i]);
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+1,i]:=Format('%.3f',[Vexp[i]]); // експ
s:=0; ss:=0;
for j:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do s:=s+StrToFloat(Cells[j,i]);
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+2,i]:=Format('%.3f',[s]); // расч
Cells[StrToInt(Edit16.Text)+3,i]:=Format('%.3f',[Vexp[i]-s]); // різниця

```

```

ss:=ss+sqr(Vexp[i]-s);
csum[i]:=sqr(Vexp[i]-s);
Series8.AddXY(i,s);
Series11.AddXY(i,Vexp[i]-s);
end;
srq:=sqrt(ss/(nToch-1));
Edit1.Text:=FToS(srq,5,3);
Delt:=2*1.66*srq;
Edit12.Text:=FToS(Delt,5,3);
end;
CloseFile(fwr);
Button16.Enabled:=true;
Button16.Caption:='Моделювання '+IntToStr(nMod);
with Form1.StringGrid9 do begin
  for i:=1 to StrToInt(Edit5.Text) do begin
    Cells[2*nMod-1,i]:=StringGrid8.Cells[StrToInt(Edit16.Text)+2,i];
    Cells[2*nMod,i]:=StringGrid8.Cells[StrToInt(Edit16.Text)+3,i]; end;
  s:=Sredn(nToch,Diff); // Cped. Diff
  Cells[2*nMod,StrToInt(Edit5.Text)+1]:=FtoS(s,6,3);
  Cells[2*nMod,StrToInt(Edit5.Text)+2]:=FtoS(sqrt(ss/(nToch-1)),6,3);
  sad:=sad+sqrt(ss/(nToch-1));
  Koh[nMod]:=sqrt(ss/(nToch-1));
  if nMod>1 then begin // Kohren
    G:=Max(nMod,Koh)/Sum(nMod,Koh);
    Cells[2*nMod,StrToInt(Edit5.Text)+3]:=FtoS(G,5,4);
    Edit19.Text:=FTos(Gkr[nMod-1],5,4);
  end;
  if G<=StrToFloat(Edit19.Text) then begin Znach:=true;
    Cells[2*nMod-1,StrToInt(Edit5.Text)+3]:='Знач->' end
  else begin Znach:=false;
    Cells[2*nMod-1,StrToInt(Edit5.Text)+3]:='Не знач->' end;
end;
with Form1.StringGrid7 do begin //Коефіцієнти впливу C{Aj(Xi)}
  for j:=1 to nC do begin
    s:=0; ss:=0;
    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
      s:=s+StrToFloat(Cells[j,i])*Vexp[i];
      ss:=ss+Vexp[i];
    end;
    Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod]:=' '+FToS(s/ss,8,7);
  end;
end;
with Form1.StringGrid10 do begin //Коефіцієнти впливу C{Aj(Xi)}
  for j:=1 to nC do begin
    s:=0; ss:=0;
    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
      s:=s+StrToFloat(Cells[j,i])*Vexp[i];
      ss:=ss+Vexp[i];
    end;
    Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod]:=' '+FToS(s/ss,8,7);
  end;
end;
for r:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin

```

```

for i:=1 to nC do begin // средние значения C
s:=0;
for j:=1 to nMod do s:=s+mC[j,r,i];
mC[nMod+1,r,i]:=s/nMod; //Array [1..nMod+1, 1.. nA, 1.. nC] of real
StringGrid10.Cells[i,r]:=FToS(s/nMod,8,7);
end;
end;
for j:=1 to nC do begin
s:=0; ss:=0;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
s:=s+StrToFloat(StringGrid7.Cells[j,i])*Vexp[i]; // !!!!
ss:=ss+Vexp[i];
end;
Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod]:=' '+FToS(s/ss,8,7);
end;
end;
if nMod>1 then Button17.Enabled:=true;
Button16.Enabled:=true;
Button15.Enabled:=true;
Button4.Enabled:=true;
Button16.Caption:='Модельювання '+IntToStr(nMod+1);
SpinEdit2.MaxValue:=nMod;
SpinEdit3.Enabled:=true;
end;

procedure TForm1.TrackBar1Enter(Sender: TObject);
begin
Button2.Visible:=true;
end;

// Модельювання і
procedure TForm1.Button16Click(Sender: TObject);
var i:byte;
begin
if nMod>3 then begin ShowMessage('Кількість моделювань обмежено 3');exit end;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do StringGrid3.Cells[1,i]:='';
Button14.Caption:='<-- Зберегти';
TabSheet2.Show;
Edit14.Text:='1';
nMod:=nMod+1; // next modeling
Button16.Enabled:=false;
Edit11.Text:='DataFile\Modal.txt';
Edit9.Text:='DataFile\Modal.txt';
Form1.Button6Click(Sender);
Form1.Button10Click(Sender);
if Contr0(StrToInt(Edit14.Text))=true then
begin
ShowMessage(' Строка '+Edit14.Text+'- нулевая - пропущена');
Form1.Button14Click(Sender);
end;
end;
end;
// На Головну

```



```

procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
begin
  TabSheet2.Show;
end;

// Btn: Завершення моделювання
procedure TForm1.Button17Click(Sender: TObject);
var
  i,j:byte;
  s:real;
  str,str1,Str2:string;
  Z:Array[1..3] of real;
begin
  with Form1.StringGrid7 do begin
    RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+nMod+2;
    Cells[0,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]:='Середнє';
    for j:=1 to nC do begin
      s:=0;
      for i:=1 to nMod do begin
        s:=s+StrToFloat(Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+i]);
      end;
      Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]:=' '+FToS(s/nMod,5,5);
    end;

    Memo3.Lines.Add('Модель '+IntToStr(SpinEdit1.Value-1)+' - го порядку');
    Memo3.Lines.Add('Проведено '+IntToStr(nMod)+'
    ' моделювань на 95% рівні достовірності');
    if Znach=true then Memo3.Lines.Add
    ('Модель Y(r) адекватна, середнє квадр. відх. адекватності =' +FtoS(sad/nMod,6,3))
    else Memo3.Lines.Add
    ('Модель Y(r) не адекватна - можливо треба збільшити кількість моделювань');
    Memo3.Lines.Add('Моделювання відтворюване');
    Memo3.Lines.Add
    ('Оцінка середньо зваженого тренду регресорів Yk[Pl(r)] на 1 крок навантаження');
    for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
      Case j of
        1: str:='Силової фактор 1'+#9;
        2: str:='Силової фактор 2'+#9;
        3: str:='Силової фактор 3'+#9;
      end;
      Case SpinEdit1.Value of
        2: begin
          Z[i]:=(StrToInt(Edit5.Text)-1)*
          StrToFloat(Cells[j+3,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]);
          str1:=' + (r-1)*'+Cells[j+3,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1];
        end;
        3: begin
          Z[i]:=(StrToInt(Edit5.Text)-1)*
          StrToFloat(Cells[j+3,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1])+
          sqr(StrToInt(Edit5.Text)-1)*
          StrToFloat(Cells[j+6,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]);
          str2:=' + (r-1)*'+Cells[j+3,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]+

```

```

    ' + (r-1)*(r-1)*'+Cells[j+6,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1];
    end;
end;
Z[i]:=Z[i]+StrToFloat(Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]);
Memo3.Lines.Add(str+ ' - P'+IntToStr(j)+
#9+Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]+str1+str2+' = '+FTos(Z[i],5,3));
end;
end;
with Form1.StringGrid10 do begin
    RowCount:=StrToInt(Edit16.Text)+nMod+2;
    Cells[0,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]:='Середнє';
    for j:=1 to nC do begin
        s:=0;
        for i:=1 to nMod do begin
            s:=s+StrToFloat(Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+i]);
        end;
        Cells[j,StrToInt(Edit16.Text)+nMod+1]:=' '+FToS(s/nMod,8,7);
    end;
end;
Memo3.Lines.Add('де r - № точки від початкової;');
Memo3.Lines.Add('результати для останньої спостереженої точки ряду r');
Button16.Enabled:=false;
Button1.Enabled:=false;
Button14.Enabled:=false;
Button28.Enabled:=true;
end;

// Протокол
procedure TForm1.Button15Click(Sender: TObject);
var
    i,j: byte;
    s:string;
begin
    Memo2.Lines.Add(StaticText2.Caption+'! Моделювання '+IntToStr(nMod));
    for i:=0 to StringGrid8.RowCount-1 do begin
        s:="";
        for j:=0 to StringGrid8.ColCount-1 do begin
            s:=s+StringGrid8.Cells[j,i]+#9;
        end;
        Memo2.Lines.Add(s);
    end;
    Memo2.Lines.Add("");
    Memo2.Lines.Add(StaticText4.Caption);

    Memo2.Lines.Add("");
    Memo2.Lines.Add(StaticText1.Caption);
    for i:=0 to StringGrid7.RowCount-1 do begin
        s:="";
        for j:=0 to StringGrid7.ColCount-1 do begin
            s:=s+StringGrid7.Cells[j,i]+#9;
        end;
        Memo2.Lines.Add(s);
    end;
end;

```

```

    end;
Memo2.Lines.Add("");
Memo2.Lines.Add(StaticText3.Caption+' '+Edit1.Text);
Memo2.Lines.Add(StaticText4.Caption+' '+Edit12.Text);
Memo2.Lines.Add("");
Memo2.Lines.Add(StaticText6.Caption);
  for i:=0 to StringGrid9.RowCount-1 do begin
    s:="";
    for j:=0 to StringGrid9.ColCount-1 do begin
      s:=s+StringGrid9.Cells[j,i]+#9;
    end;
    Memo2.Lines.Add(s);
  end;
end;

// Изменение порядка тренда C
procedure TForm1.SpinEdit1Change(Sender: TObject);
var
  i:byte;
begin
  PorC:=SpinEdit1.Value; nC:=StrToInt(Edit15.Text)*SpinEdit1.Value;
  with StringGrid2 do begin
    RowCount:=nc+1;
    StringGrid2.Cells[0,0]:=' Паp-p';
    Cells[1,0]:='C->Corr'; Cells[2,0]:='Cmin';
    Cells[3,0]:='Cmax'; Cells[4,0]:='k_C';
    Cells[0,1]:=' C10'; Cells[0,2]:=' C20'; Cells[0,3]:=' C30';
    for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
      Cells[1,i]:='0,5'; Cells[2,i]:='0,03';
      Cells[3,i]:='1'; Cells[4,i]:='1';
    end;
    if PorC>1 then
      for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
        Cells[0,i+3]:=' C'+IntToStr(i)+'1';
        Cells[1,i+3]:='0,1'; Cells[2,i+3]:='-0,0005';
        Cells[3,i+3]:='0,005'; Cells[4,i+3]:='1';
      end;
    if PorC>2 then
      for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
        Cells[0,i+6]:=' C'+IntToStr(i)+'2';
        Cells[1,i+6]:='0,1'; Cells[2,i+6]:='-0,0005';
        Cells[3,i+6]:='0,001'; Cells[4,i+6]:='1';
      end;
    end;
  with StringGrid7 do begin
    ColCount:=nc+1;
    Cells[0,0]:=' y(j)';
    Cells[1,0]:=' C10'; Cells[2,0]:=' C20'; Cells[3,0]:=' C30';
    if PorC>1 then
      for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i+3,0]:=' C'+IntToStr(i)+'1';
    if PorC>2 then
      for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i+6,0]:=' C'+IntToStr(i)+'2';

```

```

end;
with StringGrid10 do begin
ColCount:=nc+1;
Cells[0,0]:=' A(j)';
Cells[1,0]:=' C10'; Cells[2,0]:=' C20'; Cells[3,0]:=' C30';
if PorC>1 then
  for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i+3,0]:=' C'+IntToStr(i)+'1';
if PorC>2 then
  for i:= 1 to StrToInt(Edit15.Text) do Cells[i+6,0]:=' C'+IntToStr(i)+'2';
end;
end;

procedure TForm1.TabSheet8Show(Sender: TObject);
var
i,j:byte;
s:real;
begin
Edit21.Text:=IntToStr(StrToInt(Edit5.Text)+SpinEdit3.Value);
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text)+1 do
Case i of
1,6,7:Form1.CheckListBox1.Checked[i-1]:=false
else Form1.CheckListBox1.Checked[i-1]:=true end;
Sh8:=1;
Edit21.Text:=IntToStr(StrToInt(Edit5.Text)+1);
with StringGrid11 do begin
Cells[0,0]:='Сил.факт'; Cells[1,0]:='P,кН'; Cells[2,0]:='P_1';
Cells[3,0]:='P_2'; Cells[4,0]:='P_3';
Cells[0,1]:='Силової фактор P1'; Cells[1,1]:=' p1'; Cells[5,0]:='Пом.1';
Cells[0,2]:='Силової фактор P2'; Cells[1,2]:=' p2'; Cells[6,0]:='Пом.2';
Cells[0,3]:='Силової фактор P3'; Cells[1,3]:=' p3'; Cells[7,0]:='Пом.3';
Cells[0,4]:=' Разом'; Cells[1,4]:='p123';
Cells[8,0]:=' Ci'; Cells[9,0]:=' dY(Pi)'; Cells[10,0]:=' dPi';
for j:=1 to 3 do begin
s:=0;
if Sh8=1 then for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
Cells[j+1,i]:=FToS(Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)],7,3);
s:=s+Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)];
Cells[j+1,4]:=FToS(s,7,3);
end;
Cells[j+1,StrToInt(Edit15.Text)+1]:=FToS(s,7,3);
end;
end;
end;

// Обчислити
procedure TForm1.Button24Click(Sender: TObject);
var
i,j,jj,r,sm,sp:byte;
fwr:TextFile;
s,ss,sum:real;
csum:Tar1_ex;
Prog:Array[1..3] of real;

```

```

begin
sp:=SpinEdit3.Value;
with StringGrid11 do begin
  for j:=1 to 4 do for i:=5 to 7 do Cells[i,j]:= ""; // Clear of StringGrid1
for j:=1 to 3 do
  for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
  Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)+j]:=StrToFloat(Cells[j+1,i]);
end;
for j:=1 to 3 do begin // input data Tur[i,j] in StringGrid11
  ss:=0;
  for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do ss:=ss+StrToFloat(Cells[j+1,i]);
  Cells[j+1,4]:=FTos(ss,6,3);
end;
j:=SpinEdit2.Value;
Case RadioGroup7.ItemIndex of
  0: begin
  for jj:=1 to sp do begin
    for i:=1 to 3 do Prog[i]:=0;
    for r:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin
    Prog[1]:=Prog[1]+Tochka(1,nToch+jj,Br,
    StrToFloat(Cells[jj+1,1]), mC[j,r,1],mC[j,r,4],mC[j,r,7]);
    Prog[2]:=Prog[2]+Tochka(2,nToch+jj,Br,
    StrToFloat(Cells[jj+1,2]), mC[j,r,2],mC[j,r,5],mC[j,r,8]);
    Prog[3]:=Prog[3]+Tochka(3,nToch+jj,Br,
    StrToFloat(Cells[jj+1,3]), mC[j,r,3],mC[j,r,6],mC[j,r,9]);
    end;
    s:=0;
    for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
    Cells[4+jj,i]:=FToS(Prog[i],7,3);
    s:=s+Prog[i];
    end;
    Cells[4+jj,4]:=FTos(s,6,3);
  end;
Form1.RadioGroup8Click(Sender);
end;
  1: begin
  sp:=Form1.SpinEdit3.Value; // for r
  sm:=SpinEdit2.Value; // for A
Case RadioGroup8.ItemIndex of
0:Label16.Caption:='Силової фактор P1';
1:Label16.Caption:='Силової фактор P2';
2:Label16.Caption:='Силової фактор P3';
3:Label16.Caption:='Разом';
end;
with StringGrid11 do begin
for j:=1 to 3 do
  for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
  Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)+j]:=StrToFloat(Cells[j+1,i]);
end;
end; // end of with StringGrid11
for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+3 do
  for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do

```

```

    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text)+1 do A[j,r,i]:=0;
  for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
    for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin // по P (3)
      sum:=0;
      for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin // по A+summa (7)
        A[j,r,i]:=Tochka(j,r,Br,Tur[j,r],mC[sm,i,j],mC[sm,i,j+3],mC[sm,i,j+6]);
        sum:=sum+A[j,r,i];
      end;
      A[j,r,7]:=sum;
    end;
  end; // for B
  for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin // по A (7)
      B[r,i]:=0; sum:=0;
      for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin // по P (3)
        sum:=sum+A[j,r,i];
      end;
      B[r,i]:=sum;
    end;
  end; // for B[r,7]
  for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
    B[r,7]:=0;
    for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do B[r,7]:=B[r,7]+B[r,i]; //по A(6)
  end;
  // ***** Разом з моделювання по середньому
  for j:=1 to sp do begin //по № прогнозу
    for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin //по Pi
      Cells[4+j,i]:=FToS((StrToFloat(StringGrid7.Cells[i,StrToInt(Edit16.Text)+j])+
        Продолження додатку А
        StrToFloat(StringGrid7.Cells[i+3,StrToInt(Edit16.Text)+j]))*
        (j+StrToInt(Edit5.Text)-1)+
        StrToFloat(StringGrid7.Cells[i+6,StrToInt(Edit16.Text)+j]))*
        sqr(j+StrToInt(Edit5.Text)-1)),7,3);
    end;
    s:=0;
    for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
      s:=s+StrToFloat(Cells[4+j,i]);
    end;
    Cells[4+j,4]:=FTos(s,7,3);
  end;
  // *****
  end;
  end;
end;
CheckBox1.Enabled:=true;
end;

procedure Graf(j:byte); // по P (3) // по A+summa (7)
var
  r,sp:byte;
begin
  sp:=Form1.SpinEdit3.Value;

```

```

with Form1 do begin
  LineSeries1.Clear; LineSeries2.Clear; LineSeries3.Clear;
  Series12.Clear; Series13.Clear; Series14.Clear; Series15.Clear;
  for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
if Form1.CheckListBox1.Checked[0]=true then LineSeries1.AddXY(r,A[j,r,1]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[1]=true then LineSeries2.AddXY(r,A[j,r,2]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[2]=true then LineSeries3.AddXY(r,A[j,r,3]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[3]=true then Series12.AddXY(r,A[j,r,4]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[4]=true then Series13.AddXY(r,A[j,r,5]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[5]=true then Series14.AddXY(r,A[j,r,6]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[6]=true then Series15.AddXY(r,A[j,r,7]);
  end;
end;
end;

procedure GrafB; // по P (3) // по A+summa (7)
var
r,sp:byte;
kr:real;
begin
kr:=StrToFloat(Form1.Edit22.Text);
sp:=Form1.SpinEdit3.Value;
with Form1 do begin
  LineSeries1.Clear; LineSeries2.Clear; LineSeries3.Clear;
  Series12.Clear; Series13.Clear; Series14.Clear; Series15.Clear;
  for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
if Form1.CheckListBox1.Checked[0]=true then LineSeries1.AddXY(r,B[r,1]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[1]=true then LineSeries2.AddXY(r,B[r,2]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[2]=true then LineSeries3.AddXY(r,B[r,3]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[3]=true then Series12.AddXY(r,B[r,4]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[4]=true then Series13.AddXY(r,B[r,5]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[5]=true then Series14.AddXY(r,B[r,6]);
if Form1.CheckListBox1.Checked[6]=true then Series15.AddXY(r,B[r,7]);
  end;
end;
end;

//Btn: Показати
procedure TForm1.RadioGroup8Click(Sender: TObject);
var
i,j,r,sp,sm:byte;
s:string[100];
sum:real;
begin
sp:=Form1.SpinEdit3.Value; // for r
sm:=SpinEdit2.Value; // for A
Case RadioGroup8.ItemIndex of
0:Label16.Caption:='Силової фактор P1';
1:Label16.Caption:='Силової фактор P2';
2:Label16.Caption:='Силової фактор P3';
3:Label16.Caption:='Разом';
end;
end;

```

```

with StringGrid11 do begin
for j:=1 to 3 do
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)+j]:=StrToFloat(Cells[j+1,i]);
end;
end;
for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+3 do // A[j,r,i]:=0;
for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text)+1 do A[j,r,i]:=0;

for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin // по P (3)
sum:=0;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin // по A+summa (7)
if RadioGroup7.ItemIndex=1 then
A[j,r,i]:=Tochka(j,r,Br,1,mC[sm,i,j],mC[sm,i,j+3],mC[sm,i,j+6])
else
A[j,r,i]:=Tochka(j,r,Br,Tur[j,r],mC[sm,i,j],mC[sm,i,j+3],mC[sm,i,j+6]);
sum:=sum+A[j,r,i];
end;
A[j,r,7]:=sum;
end;
end; // for B
for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin // по A (7)
B[r,i]:=0; sum:=0;
for j:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin // по P (3)
sum:=sum+A[j,r,i];
end;
B[r,i]:=sum;
end;
end; // for B[r,7]
for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
B[r,7]:=0;
for i:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do B[r,7]:=B[r,7]+B[r,i]; //по A(6)
end;
Case RadioGroup8.ItemIndex of
0,1,2: Graf(RadioGroup8.ItemIndex+1);
3:begin GrafB;
// *****
Memo2.Lines.Add(' sp = '+IntToStr(sp));
for r:=1 to StrToInt(Edit5.Text)+sp do begin // по i (9)
s:="";
for j:=1 to StrToInt(Edit16.Text)+1 do begin // по A+summa (7)
s:=s+#9+Ftos(B[r,j],6,3);
end;
Memo2.Lines.Add(' '+IntToStr(r+9)+s);
end;
// *****
end;
end;end;
procedure TForm1.SpinEdit3Change(Sender: TObject);

```



```

begin
Edit21.Text:=IntToStr(StrToInt(Edit5.Text)+SpinEdit3.Value);
end;

procedure TForm1.CheckListBox1Click(Sender: TObject);
begin
Form1.RadioGroup8Click(Sender);
end;

procedure TForm1.Button26Click(Sender: TObject);
var
i,j:word;
p,S:real;
fwr:TextFile;
begin
AssignFile(fwr,'DataFile\PrognX.txt');
{$I-}
Reset(fwr);
{$I+}
If (IOResult<>0) then begin
ShowMessage('Помилка відкриття файла PrognX.txt для читання');
CloseFile (fwr);Exit end;
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
for j:=1 to 3 do begin
Read (fwr,p);
StringGrid11.Cells[j+1,i]:=FToS(p,6,3);
end;
ReadLn(fwr);
end;
CloseFile(fwr);
for j:=1 to 3 do begin
s:=0;
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
s:=s+StrToFloat(StringGrid11.Cells[j+1,i]);
StringGrid11.Cells[j+1,4]:=FToS(s,7,3);
end;
StringGrid11.Cells[j+1,StrToInt(Edit15.Text)+1]:=FToS(s,7,3);
end;
end;

// Тенденції
procedure TForm1.Button27Click(Sender: TObject);
var
i,j,jj,r,sm,sp:byte;
fwr:TextFile;
L,S:real;
Tend1:Array[1..3] of real; Tend2:Array[1..3] of real;
begin
jj:=StrToInt(Edit5.Text);
j:=SpinEdit2.Value; //j - № моделювання;r->A; mC[j,r,k];k->C
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin //Cycle for X
Tend1[i]:=0; Tend2[i]:=0; L:=0;

```

```

for r:=1 to StrToInt(Edit16.Text) do begin //Cycle for A
Tend1[i]:=Tend1[i]+mC[j,r,3+i]+2*(StrToInt(Edit5.Text)-1)*mC[j,r,6+i];
L:=L+Tochka(i,jj,Br,Tur[i,jj],mC[j,r,i],mC[j,r,i+3],mC[j,r,i+6]);
end;
StringGrid11.Cells[8,i]:=FToS(Tend1[i],6,3);
StringGrid11.Cells[9,i]:=FToS(Tend1[i]/ /*Tur[i,StrToInt(Edit5.Text)]
(StrToFloat(StringGrid5.Cells[2,i])-StrToFloat(StringGrid5.Cells[1,i])),6,3);
StringGrid11.Cells[10,i]:=FToS(L/Vexp[StrToInt(Edit5.Text)],5,3);
end;
S:=0;
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
S:=S+StrToFloat(StringGrid11.Cells[10,i]);
end;
for i:=1 to StrToInt(Edit15.Text) do begin
StringGrid11.Cells[10,i]:=FToS(StrToFloat(StringGrid11.Cells[10,i])/S,5,3);
end;
end;

// In Protocol
procedure TForm1.Button28Click(Sender: TObject);
var
i,j: byte;
s:string;
begin
Memo2.Lines.Add("");
Memo2.Lines.Add(StaticText8.Caption);
Memo2.Lines.Add(Edit21.Text);
for i:=0 to StringGrid11.RowCount-1 do begin
s:="";
for j:=0 to StringGrid11.ColCount-1 do begin
s:=s+StringGrid11.Cells[j,i]+#9;
end;
Memo2.Lines.Add(s);
end;
end;

//Зберегти результати у файлі
procedure TForm1.Button20Click(Sender: TObject);
begin
Memo2.Lines.SaveToFile(Edit20.Text);
end;

End.

```

Г.2. Модуль мінімізації MinKomplex

```

unit MinKomplex;
interface
uses
Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls,
Forms, Dialogs, StdCtrls, HelpModul;
const

```

```

Kregr=7;
n=9; nn=9; k=1; m=40; ex=12;
alfa=1.3; mxz=15; extr='min';
type Tar1_rn=array [1..n] of real;
type Tar1_rk=array [1..k] of real;
type Tar1_rm=array [1..m] of real;
type Tar1_ex=array [1..ex] of real;
type Tar2_r=array [1..m,1..n] of real;
type T_AX=array [1..3,1..ex] of real;
type T_Rik=array [1..12] of real;
type T_B=array [1..Kregr] of real;
type T_regr=array [1..Kregr,1..n] of real;
type TarC=array [1..5,1..12,1..n] of real; // [1..nMod+1, 1.. nA, 1.. nC]
type Tar1_bk=array [1..k] of byte;
type Tar1_bn=array [1..n] of byte;
type Tar1_gr=array [1..3] of real;
type Tar1_sp=array [1..100] of real;
var
  i,j,ix: word; nv,nz :LongInt;
  X:Tar1_rn; X1:Tar1_rn;X2:Tar1_rn;CX:Tar1_rn;
  sX:Tar1_rn; Delt,Eps,rX:Tar1_rn;
  TX:Tar2_r;
  Y,Y1,Y2,v:real;
  KX:Tar1_bn;
  KY:integer;
  G:Tar1_rm;
  Vexp,Vras,Yexp,Yras:Tar1_ex;
  Diff:Tar1_ex;
  Br:T_regr;
  BrX:T_B;
  Tur:T_AX;
  tau,AlfaN:real;
  mxv:Longint;
  epsilon,delta:real;
  b,bx,by:boolean; ug,ux:real;
  Wx:real;
  ft:textFile;
  nToch,PorC, nC:word; //число точек, порядок тренда C, число переменных C
  sss:real;
  maxY:real;
procedure My;
Procedure Value_Y(B:T_regr;Tur:T_AX;X:Tar1_rn;var Y:real);
procedure ExpRead(var Yexp:Tar1_ex);
function Tochka(k,r:byte;bd:T_Regr;z,c,c1,c2:real):real;
function FToS(F:Real;a,b:Byte):String;
Function Max(k:byte;z:Tar1_ex):real;
function IsFloat(ch:char):Boolean;
function IsInt(ch:char):Boolean;
implementation
uses HeadStyk;
Function Max(k:byte;z:Tar1_ex):real;
Var i:byte;

```

```

S:real;
begin
S:=-0.000000000111;
for i:=1 to k do if z[i]>S then S:= z[i];
Result:=S;
end;

// проверяет, является ли символ допустимым во время ввода целого числа
function IsInt(ch:char):Boolean;
begin
if (ch >= '0') and (ch <= '9') // цифры
or (ch = #13) // клавиша <Enter>
or (ch = #8) // клавиша <Backspace>
then Result:= True // символ допустимый
else Result:= False; // недопустимый символ
end;

// проверяет, является ли символ допустимым во время ввода дробного числа
function IsFloat(ch:char):Boolean;
begin
if (ch >= '0') and (ch <= '9') // цифры
or (ch = #13) // клавиша <Enter>
or (ch = #8) // клавиша <Backspace>
or (ch = ',')
or (ch = '-') then Result:= True // символ верный
else Result:= False; // недопустимый символ
end; // выход из функции

// точка ---> запятая
function T_Z(S:string):string;
var k,l:word;
begin k:=Length(S); for l:=0 to k-1 do if s[l]='.' then s[l]:=','; Result:=S;
end;

// Format Float To String
function FToS(F:Real;a,b:Byte):String;
var
s:string;
begin
str(F:a,b,s);
Result:=T_Z(S);
end;

function Tochka(k,r:byte;bd:T_Regr;z,c,c1,c2:real):real;
// k - № ряда x(k); z - x; c - X(k); r - точка ряду
var p2,p3,p4,p5,p6:real;
begin
p2:=z*z;
p3:=z*p2;
p4:=p2*p2;
p5:=p4*z;
p6:=p3*p3;

```

```

Result:=(c+(r-1)*c1+(r-1)*(r-1)*c2)*
(bd[1,k]+bd[2,k]*z+bd[3,k]*p2+bd[4,k]*p3+bd[5,k]*p4+bd[6,k]*p5+bd[7,k]*p6);
end;

```

```

Procedure Out_X(B:Tar1_rn);
var
j:word;
begin
for j:=1 to nC do Write(ft,B[j]:10:3); // nC nC
end;

```

```

Procedure Outs_X(B:Tar1_rn);
var
j:word;
begin
for j:=1 to nC do // nC nC
begin
Form1.Memo1.Text:=Form1.Memo1.Text+FToS(B[j],8,3);
end;
end;

```

```

Procedure Out_Y(B:Tar1_rn);
var i:word;
begin
for i:=1 to k do Write(ft,B[i]:10:3);
end;

```

```

Procedure In_OX;
var i:word;
begin
with Form1.StringGrid2 do begin
for i:=1 to nC do begin
X[i]:=StrToReal(Cells[1,i]); X1[i]:=StrToReal(Cells[2,i]);
X2[i]:=StrToReal(Cells[3,i]); KX[i]:=Round(StrToReal(Cells[4,i]));
end;
end;
end;

```

```

Procedure In_OY;
begin
ExpRead(Yexp);
Y:=StrToReal(Form1.StringGrid1.Cells[1,1]);
Y1:=StrToReal(Form1.StringGrid1.Cells[2,1]);
Y2:=StrToReal(Form1.StringGrid1.Cells[3,1]);
V:=StrToInt(Form1.StringGrid1.Cells[4,1]);
KY:=StrToInt(Form1.StringGrid1.Cells[5,1]);
end;

```

```

Procedure ExpRead(var Yexp:Tar1_ex);
var
i:byte;
begin

```

```

for i:=1 to nToch do
Yexp[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid6.Cells[i,StrToInt(Form1.Edit14.Text)]);
end;

// Вычисленное Y - значение Ak в точке x(r) = z
Procedure Value_Y(B:T_regr;Tur:T_AX;X:Tar1_mn;var Y:real);
//r = № точки; B - массив коэф. регрессии для Ak;
// X - вектор коэф-ов C; Y - вычисленное значение Ak в точке x(r) = z
// ряды Ak и x(r) отсортированы по возрастанию
var
  r:word;
  S,ss:real;
begin
ss:=0;
  for r:=1 to nToch do begin
s:=Tochka(1,r,B,Tur[1,r],X[1],X[4],X[7])+Tochka(2,r,B,Tur[2,r],X[2],X[5],X[8])+
  Tochka(3,r,B,Tur[3,r],X[3],X[6],X[9]);
ss:=ss+(s-Yexp[r])*(s-Yexp[r]);
  end;
Y:=ss;
end;

function W(X:Tar1_mn;Yexp:Tar1_ex;var Y:real):double;
var
  r:word;
  S,ss:real;
begin
ss:=0; //s:=0;
  for r:=1 to nToch do begin
s:=Tochka(1,r,Br,Tur[1,r],X[1],X[4],X[7])+Tochka(2,r,Br,Tur[2,r],X[2],X[5],X[8])+
  Tochka(3,r,Br,Tur[3,r],X[3],X[6],X[9]);
ss:=ss+(s-Yexp[r])*(s-Yexp[r]);
  end;
Result:=ss;
end;

Procedure Prov_OY(X:Tar1_mn;var b:boolean);
var
  i:word;
begin
Value_Y(Br,Tur,X,Y);
b:=true;
Case KY of
  1: if Y<Y1 then b:=false;
  2: if Y>Y2 then b:=false;
  3: if (Y<Y1)or(Y>Y2) then b:=false;
end;
end;

Procedure Prov_OX(X:Tar1_mn;var b:boolean);
var
  j:word;

```

```

begin
  b:=true;
  for j:=1 to nC do           // nC nC nC
  begin
    if KX[j]=0 then Continue
    else
      if (X[j]<X1[j])or(X[j]>X2[j]) then begin b:=false; Break; end;
    end;
  end;
end;

Procedure Korr_OX(var X:Tar1_m);
var j:word;
begin
  for j:=1 to nC do begin    // nC nC nC
    if KX[j]=0 then Continue else begin
      if X[j]<X1[j] then X[j]:=X1[j];
      if X[j]>X2[j] then X[j]:=X2[j]
    end;
  end;
end;

Procedure Generate_TX(var b:boolean);
var i,j,k2:word;
Procedure Generate_X(var X:Tar1_m);
var
  a:real;
  j:word;
begin
  for j:=1 to nC do
  begin
    a:=Random(1000)/1000;
    X[j]:=X1[j]+a*(X2[j]-X1[j]);
  end;
end;

var
  a:real;
Begin
  i:=0;
  k2:=0;
  While (i<m)and(k2<=mxv) do
  begin
    k2:=k2+1;
    if K2>=10000 then begin a:=Random(1000)/1000; AlfaN:=Alfa*(0.5+a) end;
    Generate_X(X);
    Prov_OX(X,b);
    if b=false then Continue;
    Prov_OY(X,b);
    if b=false then Continue
    else
      begin
        sss:=Y;

```

```

    i:=i+1;
    for j:=1 to nC do TX[i,j]:=X[j];           // nC nC nC
  end;
end;
if K2>mxv then begin ShowMessage('Допустима область не найдена!'); Exit end
  else Form1.Memo1.Text:='Допустима область найдена!!!!!!';
End;

```

```

Procedure Value_G(var G:Tar1_rm);
var
  i,j:word;
begin
  for i:=1 to m do
  begin
    for j:=1 to nC do X[j]:=TX[i,j];           // nC nC nC
    G[i]:=W(X,Yexp,Y);
  end;
end;

```

```

Procedure Extr_W(G:Tar1_rm;var ix:word);
var
  i,imx,imn:word;
  mx,mn:real;
begin
  mx:=G[1]; mn:=G[1]; imx:=1;imn:=1;
  for i:=2 to m do
  if G[i]>mx then begin mx:=G[i]; imx:=i; end
  else
  if G[i]<mn then begin mn:=G[i]; imn:=i; end;
  if extr='min' then ix:=imx else ix:=imn;
end;

```

```

Procedure Center_X(ix:word;var CX:Tar1_rm);
var
  i,j,m1:word;
begin
  if ix=0 then m1:=m else m1:=m-1;
  for j:=1 to nC do                               // nC nC nC
  begin
    CX[j]:=0;
    for i:=1 to m do
    if i<>ix then CX[j]:=CX[j]+TX[i,j];
    CX[j]:=CX[j]/m1;
  end;
end;

```

```

Procedure Sdvig_X(var X:Tar1_rm);
Var
  j:word;
begin
  for j:=1 to nC do X[j]:=(X[j]+CX[j])/2;         //// nC nC nC
  Prov_OY(X,b);

```


end;

Procedure Vidobr_X(var X:Tar1_m);

var

j:word;

begin

 alfaN:=alfa;

 ix:=0;

 for j:=1 to nC do X[j]:=CX[j]+alfaN*(CX[j]-X[j]); // nC nC nC

end;

Procedure End_it(var sX,rX:Tar1_m;var ug,ux:real);

var

 i,j:word;

 sg:double;

begin

 sg:=0;

 for i:=1 to m do sg:=sg+G[i];

 sg:=sg/m;

 ug:=0;

 for i:=1 to m do ug:=ug+sqr(G[i]-sg);

 ug:=ug/m; // /Max(m,G)

 Center_X(0,sX);

 for j:=1 to nC do begin

 rX[j]:=0;

 for i:=1 to m do rX[j]:=rX[j]+sqr((TX[i,j]-sX[j])/X[j]);

 rX[j]:=rX[j]/m;

 end;

 ux:=rX[1];

 for j:=2 to nC do

 if rX[j]>ux then ux:=rX[j];

end;

Procedure Step_it(ix:word;var X:Tar1_m;var Wx:real;var nz:LongInt);

var

 j:word;

 We:real;

function z(z1,z2:real):boolean;

var

 t:boolean;

begin

 if extr='min' then

 if z1<z2 then t:=true else t:=false

 else

 if z1>z2 then t:=true else t:=false;

 z:=t;

end;

procedure It_sdvig;

begin

 nz:=0;

 Repeat

```

Sdvig_X(X); Wx:=W(X,Yexp,Y);
nz:=nz+1;
Until ((b=true)and(z(Wx,We)=true)or(nz>mxz));
end;
begin
for j:=1 to nC do X[j]:=TX[ix,j];           // nC nC nC
We:=G[ix];
Vidobr_X(X);
Wx:=W(X,Yexp,Y);
Prov_OY(X,by);
Prov_OX(X,bx);
b:=by and bx;
if (b=true)and(z(Wx,We)=true) then Exit;
if (b=true)and(z(Wx,We)=false) then It_sdvig;
if (b=false) then It_sdvig;
end;

procedure My;
var
i,j:integer;
t,Ws,Delt,s,S9,Sxi:real;
Str:string;
Label 1;
Begin
tau:=Form1.stepT;
Randomize;
In_OX;
In_OY;
Generate_TX(b);
if b=false then Exit;
Value_G(G);
nv:=1;
Repeat
Extr_W(G,ix);
Center_X(ix,CX);
Prov_OX(CX,bx);
if bx=false then Korr_OX(CX);
i:=ix;
Prov_OY(CX,by);
if by=false then begin
Goto 1;
end;
Step_it(ix,X,Wx,nz);
for j:=1 to nC do TX[i,j]:=X[j];           //// nC nC nC
G[i]:=Wx;
nv:=nv+1;
Form1.TrackBar1.Position:=nv;
if nv>mxv then
begin
Form1.Memo1.Lines.Add('Допущена кількість відображень вичерпано');
End_it(sX,rX,ug,ux); Goto 1;
end;
end;

```

```

End_it(sX,rX,ug,ux);
Until (ug<=epsilon)or(ux<=delta);
1:
Extr_W(G,ix);
for j:=1 to nC do X[j]:=TX[ix,j];           // nC nC nC
Wx:=G[ix];
Sxi:=0;
  with Form1.Memo1.Lines do begin
    Add('Точність по критерію delta = '+ftos(ux,10,9));
    Add('Точність по критерію epsilon = '+ftos(ug,10,9));
    Add('Розв'язок (екстремальна точка комплексу)');
    Add(' Модаj '+#9+' cj0'+#9+' cj1'+#9+' cj2'+#9+' Тренд');
    for j:=1 to StrToInt(Form1.Edit15.Text) do begin
      S9:=x[j]+(nToch-1)*x[j+3]+sqr(nToch-1)*x[j+6];
      Str:="";
      Str:=IntToStr(j)+' '+#9+ftos(x[j],7,4)+#9+ftos(x[j+3],7,4)+
      #9+ftos(x[j+6],7,4)+#9+ftos(S9,7,4);
      Add(Str);
    end;

for i:=1 to nC do Form1.StringGrid2.Cells[1,i]:=Format('%.8f',[x[i]]);
ws:=0;
Y:=0;
  for i:=1 to nToch do
    begin
      tau:=(i-1)*Form1.stepT;
      s:=Tochka(1,i,Br,Tur[1,i],X[1],X[4],X[7])+Tochka(2,i,Br,Tur[2,i],X[2],X[5],X[8])+
      Tochka(3,i,Br,Tur[3,i],X[3],X[6],X[9]);
      Yras[i]:=s;
      Diff[i]:=(Yexp[i]-Yras[i]);
      Ws:=ws+Diff[i]*Diff[i];
    end;
  Delt:=sqrt(ws/(nToch-1));
  Form1.Edit10.Text:=Format('%.4f',[Delt]);
  Add('i '+#9+'Yexp'+#9+'Yras'+#9+' Diff');
  for i:=1 to nToch do begin
    Add(IntToStr(i)+#9+ftos(Yexp[i],5,3)+#9+
    ftos(Yras[i],5,2)+#9+ftos(Diff[i],4,3));
  end;
end; // end of "with Form1.Memo1.Lines .."
end;

end.

```

Б.3. Допоміжний модуль HelpModul

```

unit HelpModul;

interface
uses
  Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, ComCtrls, Grids, StdCtrls, jpeg, ExtCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart;

```

```

Const Pi=3.1415927;
Type T_A = array of real;
function GrRad(Gr:real):real;
function RadGr(Rad:real):real;
function Sredn(r:word;A:Array of real):real;
function Disp(r:word;Sr:real;A:Array of real):real;
function Sum(r:word;A:Array of real):real;
function Sum2(r:word;A:Array of real):real;
function Contr0(r:byte):Boolean;

implementation
uses HeadStyk;

//Проверка на 0 строки таблицы A: Result:=true, если строка нулевая
function Contr0(r:byte):Boolean;
var
s:real;
i,L:byte;
begin
L:=StrToInt(Form1.Edit15.Text)*Form1.SpinEdit1.Value;
Result:=true;
  for i:=1 to StrToInt(Form1.Edit5.Text) do
    if StrToFloat(Form1.StringGrid6.Cells[i,r])<>0 then Result:=false;
  if Result=true then
    for i:=1 to L do Form1.StringGrid2.Cells[1,i]:='0';
end;

function GrRad(Gr:real):real;
begin
Result:=Gr*Pi/180;
end;

function RadGr(Rad:real):real;
begin
Result:=Rad*180/Pi;
end;

// Среднее значений элементов вектора A
function Sredn(r:word;A:Array of real):real;
var
i:word;
begin
Result:=0;
for i:=0 to r-1 do Result:=Result+A[i];
Result:=Result/(r);
end;

// Дисперсия значений элементов вектора A
function Disp(r:word;Sr:real;A:Array of real):real;
//r - разм-ть вектора A; Sr - среднее значений элементов вектора A
var
i:word;

```

```

begin
Result:=0;
for i:=0 to r-1 do Result:=Result+sqr(A[i]-Sr);
Result:=Result/(r-1);
end;

// Сумма элементов вектора A
function Sum(r:word;A:Array of real):real;
//r - разм-ть вектора A; Sr - среднее значений элементов вектора A
var
i:word;
begin
Result:=0;
for i:=0 to r-1 do Result:=Result+A[i];
end;

// Сумма sqr элементов вектора A
//r - разм-ть вектора A; Sr - среднее значений элементов вектора A
function Sum2(r:word;A:Array of real):real;
var
i:word;
begin
Result:=0;
for i:=0 to r-1 do Result:=Result+sqr(A[i]);
end;

end.

```

ДОДАТОК В

Програма STYK автоматизації процесу моделювання деформацій стиків

Реалізація програми моделювання починається із головного вікна, яке містить меню вибору операцій та відповідні вкладки, що допомагають досліднику зробити правильний вибір.

Меню програми містить сім вкладок (рис. В.1): «Головна», «Графіки», «Моди 1-3», «Змішані моди», «Результати», «Справка» та «Протокол». Основна функція головної вкладки – забезпечення отримання вхідних даних та здійснення процесу моделювання.

В верхній лівій частині головного вікна виводяться результати моделювання: інформація про стан моделювання, знайдені модальні параметри для залежних змінних, порівняння експериментальних та розрахункових даних. В нижній лівій частині вікна виводиться середньоквадратична помилка апроксимації при розрахунку модальних параметрів моделювання.

Кнопка «Вивести графіки» виводить сумісні графіки експериментальних (відомих) та промодельованих (розрахункових) значень для кожного фактору:

Коли промодельовані задачі для усіх зміщень Y_i програма автоматично переходить на вкладку «Результати», де містяться всі вихідні данні процесу моделювання та здійснюється їх аналіз. Для точності визначення коефіцієнтів впливу може бути здійснено повторне моделювання.

У вікні результатів відображається таблиця «Результати поточного розрахунку і порівняння розрахункової погрішності зі спостереженими даними». Графічне зображення ліній експериментальної та розрахункової погрішності доводить адекватність здійсненого моделювання.

Таблиця «Коефіцієнти впливу $C\{Y_l (P_r)\}$ » містить значення модальних параметрів поточного моделювання для кожної залежної змінної y_l , їх середньоквадратичну помилку апроксимації здійснену при розрахунках, значення 95%-го двостороннього довірчого інтервалу моделювання, а також середнє значення впливу коефіцієнтів $C\{Y_l (P_r)\}$ на промодельоване розрахункове значення погрішності y_l^P .

Результати моделювання по параметру r та статистична перевірка результатів експерименту зображуються у відповідній таблиці «Результати розрахунку по часу r ». Перевіряється однорідність дисперсій знайденої функції розрахунку погрішності y_l за допомогою критерію Кохрена, що необхідно для правильної обробки та використання результатів моделювання.

Панель «Результати і статистичне оцінювання моделювання» виводить вихідні середньозважені промодельовані значення коефіцієнтів $C_{ii}^{(\xi)}$, вказує кількість моделювань ситуації, а також перевіряє отриману вихідну модель на адекватність та визначає її відтворюваність, тобто чи властивості моделі співпадають з властивостями об'єкта, що моделюється.

На рис. В.1 наведене головне вікно програми STYK з поточними даними моделювання. Результати підбору модальних параметрів C згідно формулі (3.8) відображаються на вкладниці „Головна” у таблиці «Обмеження модальних параметрів тренду Cl » в стовпчику « $C \rightarrow C_{opt}$ ». При цьому контролюються нижня і верхня границі їх варіювання у стовпчиках « C_{min} » і « C_{max} ». Їх коректування можливе вручну, або клацанням кнопки «Коректувати обмеження C ». При цьому програма здвигає границі C із врахуванням тенденції поточного зміщення значень коефіцієнтів C при роботі програми.

Візуальний контроль процедури пошуку здійснюється відкриванням вкладок: „Графіки” (рис. 3.12), „Моди 1-3” (рис. 3.13), „Змішані моди” (рис. 3.14).

На вкладці „Графіки” візуально контролюється збіг теоретичної і експериментальної кривих погрішності розміру від поточного силового фактору у стику, а також відображається двобічний довірчий інтервал похибки по залишках.

На вкладці «Моди 1-3» можна візуально оцінити характер зміни кожної складової сили різання (моди).

На вкладці „Змішані моди” можна візуально оцінити вплив кожної складової сили різання (моди) на погрішності розміру від поточного силового фактору у стику. При цьому можна комбінувати сумарний вплив складових мод і порівнювати їх з теоретичної і експериментальної кривими.

Вкладка „Справка” слугує для допомоги користувачу у підготовці початкових даних моделювання та інтерпретації результатів. На вкладці «Протокол» ведеться протоколювання процесу моделювання. Цю інформацію можна за бажанням вивести у текстовий файл з довільним ім'ям.

Вкладки «Результати» і «Моделювання» призначені для виводу результатів моделювання.

Smodel

Головна | Графіки | Моді 1 - 3 | Змішані моді | Результати | Справка | Протокол | Моделювання

Допустима область знайдена!!!!!!
 Точність по критерію delta = 0,021080611
 Точність по критерію epsilon = 0,000000001
 Розв'язок (екстремальна точка комплексу)

Модя	cj0	cj1	cj2	Тренд
1:	0,2594	-0,0000	0,0004	0,2818
2:	0,6436	-0,0010	-0,0002	0,6206
3:	0,1234	-0,0002	-0,0002	0,1089

i	Yexp	Yras	Diff
1	0,000	-0,10	0,099
2	3,000	2,85	0,153
3	6,000	5,62	0,383
4	8,000	8,09	-0,093
5	10,000	10,30	-0,300
6	12,000	12,19	-0,190
7	14,000	13,74	0,255
8	15,000	14,89	0,114
9	15,500	15,61	-0,114

Start*** = 20

Виконання задач для координат Ki

Ki	Статус
K1	Ready
K2	
K3	
K4	
K5	
K6	

СТАРТ

<- Зберегти

Коректувати обмеження C

Незалежних факторів X: 3 № ряду X: 1 Порядок тренду C: 3

Залежних факторів A: 6 № ряду A: 2

Вести ряди Pi з файла <-- DataFile\X.txt

Вести ряди A з файла <-- DataFile\A.txt

Вести обмеження модальних параметрів із файла <-- DataFile\Moda2.txt

Вести коеф. регресії із файла DataFile\KoeffA2.txt

Зберегти обмеження у файлі --> DataFile\Moda2.txt

Сер.кв. помилка апроксимації: 0,222

Вивести графіки

ВИХІД

Обмеження по Y1

	Y пом	Y min	Y max	v Y	k Y
Yexp	0		31,000	1	1

Число Експериментальних точок: 9
 Крок часу: 1
 Відн. точність по X (delta): 0,00020000
 Відн. точність по Y (epsilon): 0,000000001
 Граничне число стиснень комплексу: 4000

Оцінити парні кореляції рядків X і A

12.02.2011 14:39:00

Ряди Pi(r)

Слуп P	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	0,000	0,054	0,108	0,161	0,215	0,269	0,323	0,376	0,430
P2	0,000	0,056	0,113	0,169	0,225	0,281	0,338	0,394	0,450
P3	0,000	0,096	0,193	0,289	0,385	0,481	0,578	0,674	0,770

Ряди Y1(r)

Коорд. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	3,000	6,000	8,000	10,000	12,000	14,000	15,000	15,500
3	0,000	0,560	1,800	2,690	4,050	5,340	6,810	8,890	10,270
4	0,000	0,300	0,930	1,460	1,770	2,100	2,470	3,070	3,620
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	2,930	5,200	6,500	7,150	7,800	8,450	9,430	10,240
Y exp	0,000	6,790	13,930	18,650	22,970	27,240	31,730	36,390	39,630

Коефіцієнти регресії Y(Pi(r))

	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Y(P1(r))	-0,09600	55,17200	-27,97000	-37,94400	0,00000	0,00000	0,00000
Y(P2(r))	-0,09600	52,72000	-25,53900	-33,10700	0,00000	0,00000	0,00000
Y(P3(r))	-0,09600	30,81000	-8,72270	-6,60810	0,00000	0,00000	0,00000

Обмеження модальних параметрів тренду C1

Пар-р	C->Согр	Cmin	Cmax	k C
C10	0,25943640	0,03000000	0,5	1
C20	0,64358293	0,30000000	1,0	1
C30	0,12343988	0,03000000	0,2	1
C11	-0,00004116	-0,00050000	0,0005	1
C21	-0,00099078	-0,001	0,0005	1
C31	-0,00017403	-0,0006	0,0005	1
C12	0,00035476	-0,00060000	0,0005	1
C22	-0,00023552	-0,00050000	0,0005	1
C32	-0,00020522	-0,00050000	0,0010	1

Поточні параметри точності обчислень

	Delta	Epsilon
K1	0,000100000	0,000001000
K2	0,000020000	0,000000001
K3	0,000010000	0,000000001
K4	0,000000500	0,000000001
K5	0,000100000	0,005000000
K6	0,000100000	0,000001000

Рис. В.1. Головне вікно програми STYK

ДОДАТОК В

Програма STYK автоматизації процесу моделювання деформацій стиків

Реалізація програми моделювання починається із головного вікна, яке містить меню вибору операцій та відповідні вкладки, що допомагають досліднику зробити правильний вибір.

Меню програми містить сім вкладок (рис. В.1): «Головна», «Графіки», «Моди 1-3», «Змішані моди», «Результати», «Справка» та «Протокол». Основна функція головної вкладки – забезпечення отримання вхідних даних та здійснення процесу моделювання.

В верхній лівій частині головного вікна виводяться результати моделювання: інформація про стан моделювання, знайдені модальні параметри для залежних змінних, порівняння експериментальних та розрахункових даних. В нижній лівій частині вікна виводиться середньоквадратична помилка апроксимації при розрахунку модальних параметрів моделювання.

Кнопка «Вивести графіки» виводить сумісні графіки експериментальних (відомих) та промодельованих (розрахункових) значень для кожного фактору:

Коли промодельовані задачі для усіх зміщень Y_i програма автоматично переходить на вкладку «Результати», де містяться всі вихідні данні процесу моделювання та здійснюється їх аналіз. Для точності визначення коефіцієнтів впливу може бути здійснено повторне моделювання.

У вікні результатів відображається таблиця «Результати поточного розрахунку і порівняння розрахункової погрішності зі спостереженими даними». Графічне зображення ліній експериментальної та розрахункової погрішності доводить адекватність здійсненого моделювання.

Таблиця «Коефіцієнти впливу $C\{Y_l (P_r)\}$ » містить значення модальних параметрів поточного моделювання для кожної залежної змінної y_l , їх середньоквадратичну помилку апроксимації здійснену при розрахунках, значення 95%-го двостороннього довірчого інтервалу моделювання, а також середнє значення впливу коефіцієнтів $C\{Y_l (P_r)\}$ на промодельоване розрахункове значення погрішності y_l^P .

Результати моделювання по параметру r та статистична перевірка результатів експерименту зображуються у відповідній таблиці «Результати розрахунку по часу r ». Перевіряється однорідність дисперсій знайденої функції розрахунку погрішності y_l за допомогою критерію Кохрена, що необхідно для правильної обробки та використання результатів моделювання.

Панель «Результати і статистичне оцінювання моделювання» виводить вихідні середньозважені промодельовані значення коефіцієнтів $C_{ii}^{(\xi)}$, вказує кількість моделювань ситуації, а також перевіряє отриману вихідну модель на адекватність та визначає її відтворюваність, тобто чи властивості моделі співпадають з властивостями об'єкта, що моделюється.

На рис. В.1 наведене головне вікно програми STYK з поточними даними моделювання. Результати підбору модальних параметрів C згідно формулі (3.8) відображаються на вкладниці „Головна” у таблиці «Обмеження модальних параметрів тренду Cl » в стовпчику « $C \rightarrow C_{opt}$ ». При цьому контролюються нижня і верхня границі їх варіювання у стовпчиках « C_{min} » і « C_{max} ». Їх коректування можливе вручну, або клацанням кнопки «Коректувати обмеження C ». При цьому програма здвигає границі C із врахуванням тенденції поточного зміщення значень коефіцієнтів C при роботі програми.

Візуальний контроль процедури пошуку здійснюється відкриванням вкладок: „Графіки” (рис. 3.12), „Моди 1-3” (рис. 3.13), „Змішані моди” (рис. 3.14).

На вкладці „Графіки” візуально контролюється збіг теоретичної і експериментальної кривих погрішності розміру від поточного силового фактору у стику, а також відображається двобічний довірчий інтервал похибки по залишках.

На вкладці «Моди 1-3» можна візуально оцінити характер зміни кожної складової сили різання (моди).

На вкладці „Змішані моди” можна візуально оцінити вплив кожної складової сили різання (моди) на погрішності розміру від поточного силового фактору у стику. При цьому можна комбінувати сумарний вплив складових мод і порівнювати їх з теоретичної і експериментальної кривими.

Вкладка „Справка” слугує для допомоги користувачу у підготовці початкових даних моделювання та інтерпретації результатів. На вкладці «Протокол» ведеться протоколювання процесу моделювання. Цю інформацію можна за бажанням вивести у текстовий файл з довільним ім'ям.

Вкладки «Результати» і «Моделювання» призначені для виводу результатів моделювання.

Smodel

Головна | Графіки | Моді 1 - 3 | Змішані моді | Результати | Справка | Протокол | Моделювання

Допустима область знайдена!!!!!!
 Точність по критерію delta = 0,021080611
 Точність по критерію epsilon = 0,000000001
 Розв'язок (екстремальна точка комплексу)

Модаж	cj0	cj1	cj2	Тренд
1:	0,2594	-0,0000	0,0004	0,2818
2:	0,6436	-0,0010	-0,0002	0,6206
3:	0,1234	-0,0002	-0,0002	0,1089

Виконання задач для координат Kі

Kі	Статус
K1	Ready
K2	
K3	
K4	
K5	
K6	

СТАРТ

<<< Зберегти

Коректувати обмеження С

Незалежних факторів X № ряду X Порядок тренду С

Залежних факторів А № ряду А

Ввести ряди Pі з файла <--> DataFile\X.txt

Ввести ряди А з файла <--> DataFile\A.txt

Ввести обмеження модальних параметрів із файла <--> DataFile\Moda2.txt

Ввести коеф.регресії з файла DataFile\KoeffA2.txt

Зберегти обмеження у файлі --> DataFile\Moda2.txt

Сер.кв. помилка апроксимації:

Вивести графіки

ВИХІД

Обмеження по Yі

	Y nom	Y min	Y max	v Y	k Y
Yexp	1	0	31,000	1	1

Число Експериментальних точок
 Крок часу
 Відн. точність по X (delta)
 Відн. точність по Y (epsilon)
 Граничне число стиснень комплексу

Оцінити парні кореляції рядків X і А

12.02.2011 14:39:00

Ряди Pі(r)

Сила P	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	0,000	0,054	0,108	0,161	0,215	0,269	0,323	0,376	0,430
P2	0,000	0,056	0,113	0,169	0,225	0,281	0,338	0,394	0,450
P3	0,000	0,096	0,193	0,289	0,385	0,481	0,578	0,674	0,770

Ряди Yі(r)

Коорд.№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	3,000	6,000	8,000	10,000	12,000	14,000	15,000	15,500
3	0,000	0,560	1,800	2,690	4,050	5,340	6,810	8,890	10,270
4	0,000	0,300	0,930	1,460	1,770	2,100	2,470	3,070	3,620
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	2,930	5,200	6,500	7,150	7,800	8,450	9,430	10,240
Y exp	0,000	6,790	13,930	18,650	22,970	27,240	31,730	36,390	39,630

Коефіцієнти регресії Y[Pі(r)]

	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Y[P1(r)]	-0,09600	55,17200	-27,97000	-37,94400	0,00000	0,00000	0,00000
Y[P2(r)]	-0,09600	52,72000	-25,53900	-33,10700	0,00000	0,00000	0,00000
Y[P3(r)]	-0,09600	30,81000	-8,72270	-6,60810	0,00000	0,00000	0,00000

Обмеження модальних параметрів тренду Сі

Пар-р	С->Сopt	Сmin	Сmax	k C
C10	0,25943640	0,03000000	0,5	1
C20	0,64358293	0,30000000	1,0	1
C30	0,12343988	0,03000000	0,2	1
C11	-0,00004116	-0,00050000	0,0005	1
C21	-0,00099078	-0,001	0,0005	1
C31	-0,00017403	-0,0006	0,0005	1
C12	0,00035476	-0,00060000	0,0005	1
C22	-0,00023552	-0,00050000	0,0005	1
C32	-0,00020522	-0,00050000	0,0010	1

Поточні параметри точності обчислень

	Delta	Epsilon
K1	0,000100000	0,000001000
K2	0,000020000	0,000000001
K3	0,000010000	0,000000001
K4	0,000000500	0,000000001
K5	0,000100000	0,005000000
K6	0,000100000	0,000001000

Рис. В.1. Головне вікно програми STYK



ДОЧІРНЕ ПІДПРИЄМСТВО "АВТОСКЛАДАЛЬНИЙ ЗАВОД № 1"

вул. Рівненська, 42, м. Луцьк, 43010, тел./факс (0332) 78-41-25
 E-mail: dp1@luzk.com, Web-сторінка <http://www.luzk.com>, код ЄДРПОУ 21752230

27.02.15 № 23/02-07

На № _____ від _____

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Четвержука Т. І.
 на ДП «Автоскладальний завод №1» ПАТ «АК «Богдан Моторс» (м. Луцьк)

ДП «Автоскладальний завод №1» планує використати методикку і програмне забезпечення, які розроблені в дисертаційній роботі здобувачем Четвержуком Т.І. на тему «Підвищення ефективності діагностики стикових з'єднань токарних верстатів», для підвищення динамічної жкості верстатів, що дозволить забезпечити точнісну надійність технологічного обладнання, яке використовується на заводі.

Директор технічної
 головний конструктор
 Головний технолог



Б.С. Гвоздик

В.О.Марущак

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Заступник директора з
 виробництва АТ «СКФ Україна»
 (публічне)
 Бурбан А.П.
 2015р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача Четвержука Т. І.
 на АТ «СКФ Україна» (публічне) (м. Луцьк)

Стикові з'єднання у верстатах в значній мірі визначають точність, продуктивність і термін служби верстатів, прогнозувати які доволі проблематично, особливо в автоматизованому виробництві. На підприємстві АТ «СКФ Україна» (публічне) (м. Луцьк) для обробки деталей підшипників в основному використовуються токарні автоматизовані верстати.

Результати дисертаційної роботи здобувача Луцького НТУ Четвержука Т.І. на тему «Підвищення ефективності діагностики стикових з'єднань токарних верстатів» будуть використані при модернізації верстатів основного виробництва. А саме: методика і програмно-математичне забезпечення, за допомогою якого можна автоматизувати діагностику динамічних властивостей деформаційних стикових з'єднань.

Начальник ТКВ
 Начальник УТЗСВ



Баран В.М.
 Нестерук М.К.

**АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**



АКТ

про використання в навчальному процесі результатів дисертаційного дослідження здобувача Четвержука Тараса Івановича на тему: «Підвищення ефективності діагностики стикових з'єднань токарних верстатів» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процесі механічної обробки, верстати та інструменти.

Комісія у складі:

Голова – д.т.н., професор, Рудь В.Д.

Члени комісії – к.т.н., доцент, Редько Р.Г., к.т.н., доцент Поліщевич Р.М.

цим актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Четвержука Тараса Івановича на тему: «Підвищення ефективності діагностики стикових з'єднань токарних верстатів» використані співробітниками кафедри КПВ та ТМ Луцького національного технічного університету при підготовці і викладанні курсів лекцій «Металообробне обладнання» та «Обладнання та транспорт механообробних цехів», а також в курсовому та дипломному проєктуванні.

Голова комісії
Рудь Віктор Дмитрович
(д.т.н., професор)

Члени комісії
Редько Ростислав Григорович
(к.т.н., доцент)

Поліщевич Роман Миколайович
(к.т.н., доцент)

«__» _____ 201_ р.

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 57892

Комп'ютерна програма "Дослідження і прогнозування розвитку
коінтегрованих рядів динаміки" ("ConRow")
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Четвержук Тарас Іванович, Гордєєв Олександр Федорович**
(повне ім'я, поведомім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018**
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації **26.12.2014**

Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
А.Г.Жарінова



