

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Нагорний Володимир В'ячеславович

УДК 621.9.012/.014 (043.3)

**КОНТРОЛЬ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ  
МЕТАЛООБРОБНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ  
ТА МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ РЕСУРСУ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**ЗАЛОГА Вільям Олександрович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри технології машинобудування,  
верстатів та інструментів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ЗІНЬКОВСЬКИЙ Анатолій Павлович**,  
Інститут проблем міцності  
ім. Г.С.Писаренка НАН України,  
завідувач відділу коливань і вібраційної  
надійності

кандидат технічних наук  
**ЛЕЙКИХ Дмитро Володимирович**,  
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО»,  
провідний науковий співробітник  
відділу газодинаміки, динаміки та міцності СКБ.

Захист дисертації відбудеться «4» грудня 2015р. о 13.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «3» листопада 2015 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
К55.051.03, к.т.н., доц.

Є.М. Савченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Визначення ресурсу є важливою і до кінця не вирішеною проблемою експлуатації різноманітного промислового обладнання, серед якого значне місце займають металообробні технологічні системи (далі – обробні системи). Щодо останніх, то проблема ускладнюється ще й тим, що ресурс цих технічних систем змінюється в широких межах: від декількох хвилин і годин для різального інструменту до місяців і років – для вузлів верстата. Подібне варіювання ресурсу пояснюється різною швидкістю зміни визначального параметра обробних систем – зношення їх основних елементів, що призводить до різночасності досягнення ними свого граничного стану.

Оперативний контроль величини цих визначальних параметрів у процесі роботи обробних систем на даний час не уявляється можливим. Із цієї причини застосовують непрямі методи контролю, що за критерії розмежування ступеня критичності динамічної поведінки обробних систем використовують параметри різних інформаційних сигналів, які супроводжують їх роботу.

Найчастіше з цією метою розглядають амплітуду коливань об'єкта спостереження. Але в даному випадку на відміну, наприклад, від роторних машин, для яких існують норми віброактивності, для обробних систем вони відсутні, що істотно ускладнює проблему, так як не дозволяє виконати екстраполяцію контрольованого інформаційного сигналу до зазначеної в нормах його гранично допустимої величини.

Однак, практика засвідчує, що амплітуда коливань обробних систем у процесі їх роботи поступово змінюється, узгоджуючись із певною закономірністю (тенденцією). Цю тенденцію у подальшому будемо називати трендом. Якщо описати тренд аналітичною залежністю, до коефіцієнтів якої у вигляді числового значення входить і ресурс, то оперативне обчислення цих коефіцієнтів за результатами безперервного контролю тренду дозволяє визначати фактичне напрацювання обробної системи до відмови, що реалізується в дійсності.

Природно, контроль тренду та подальша обробка зареєстрованої інформації повинні бути автоматизованими, що створить передумови для впровадження у промисловість розробленого методу визначення ресурсу розглянутих машинобудівних конструкцій.

Таким чином, актуальність і практична значущість розв'язання задачі контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем і розроблення методу визначення їх ресурсу за результатами контролю тренду амплітуди коливань цих систем у зазначеній постановці безсумнівна.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі металорізальних верстатів та інструментів СумДУ відповідно до координаційного плану Міністерства освіти і науки України в рамках держбюджетної теми «Підвищення віброресурсу процесів фрезерування та точіння складнопрофільних деталей із важкооброблюваних матеріалів на основі керування і оптимізації геометрії різальної частини інструментів» (0113U000136).

**Мета і задачі дослідження.** *Метою роботи* є розвиток методів контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем і визначення на цій основі їх ресурсу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **основні задачі**:

- проаналізувати літературні дані та розрахунково-експериментальним методом підтвердити і узагальнити відомі з літератури і практики дані про зміну в часі під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів динамічної поведінки обробних систем;

- розробити діючий у режимі реального часу алгоритм безперервного контролю динамічної поведінки обробних систем та реалізувати його у вигляді програмного продукту;

- розробити метод визначення ресурсу обробних систем на основі контролю тренду інформаційного сигналу, що супроводжує їх роботу впродовж виконання заданої технологічної операції;

- розробити критеріальні параметри, які за відсутності норм, що регламентують ступінь критичності динамічної поведінки обробних систем, дозволять застосувати подібну регламентацію й для даного типу промислового обладнання;

**Об'єкт дослідження** – коливання обробних систем.

**Предмет дослідження** – динамічні процеси, що відбуваються в обробних системах під час їх функціонування, та метод визначення їх ресурсу.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених задач використовувався комплекс методів, що ґрунтуються на теоріях коливань, механіки руйнування, ідентифікації та математичній статистиці. Розроблення алгоритму контролю динамічної поведінки обробної системи та аналіз експериментальних даних здійснювалися на основі методів теорії «нечітких множин», цифрової обробки сигналів, методів оптимізації й теорії інформації. При параметричній ідентифікації прогнозної моделі були використані методи випадкового пошуку.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- уперше розрахунково встановлено та експериментально підтверджено подібність тренду амплітуди коливань обробних систем і кривої зношення їх слабкої ланки – різального інструменту, що стало підґрунтям для розроблення алгоритму контролю динамічної поведінки таких систем;

- розроблено новий метод визначення ресурсу обробних систем, числове значення якого обчислюється за допомогою параметричної ідентифікації аналітичної залежності, що описує тренд амплітуди їх коливань, який спостерігається впродовж усього контрольованого періоду;

- оперативний контроль динамічної поведінки обробних систем та одержана на цій основі інформація про їх фактичний ресурс дозволили вперше цілеспрямовано вибирати режими роботи обробних систем для продовження в заданих межах терміну їх бездефектної роботи;

- на основі інформації про фактичний ресурс обробних систем розроблено показники їх стану, які вперше, компенсуючи відсутність необхідних нормативів, дозволяють розмежовувати динамічну поведінку даних системи за ступенем її критичності.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблений діючий у реальному часі алгоритм контролю динамічної поведінки обробної системи та його програмна реалізація дозволили автоматизувати процес здійснення у виробничих умовах контролю динамічної

поведінки обробних систем, визначення їх ресурсу та адаптивне керування на цій основі процесом її функціонування;

– розроблені в цій роботі способи аналізу інформації про динамічну поведінку обробної системи та програмний продукт, що реалізує ці способи на практиці у складі мікропроцесорного пристрою, є новаторськими, це засвідчено чотирма патентами України;

– результати роботи у вигляді мікропроцесорного прогнозно-діагностичного комплексу впроваджені на ПАТ «Сумське машинобудівне НВО» і в ТОВ «ТРІЗ» ЛТД, що підтверджено відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Подані до захисту основні положення дисертаційної роботи одержані здобувачем особисто. У публікаціях, виданих у співавторстві, здобувачеві належать такі наукові результати: розроблення методології забезпечення якості виробу методами вібродіагностики [1]; аналіз з використанням методів математичного моделювання динамічної поведінки типових обробних систем фрезерного і токарного верстатів [2, 10]; алгоритм функціонування та програмне забезпечення мікропроцесорної системи контролю динамічної поведінки обробної технологічної системи [3]; метод вибору оптимальних параметрів роботи обробної системи на основі визначення її ресурсу [4, 5, 11]; аналітичні вирази прогнозних моделей для визначення ресурсу елементів обробної системи [9, 14] і показників технічного стану елементів обробної системи [8, 12]; кореляційна залежність між звуковим сигналом, кривою зношення різального інструменту та параметрами якості виробу [6, 7, 13, 15]; патенти України на корисну модель [24 – 27].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: I Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства» (Луганськ, 2010 р.), Першій міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011» (Вінниця, 2011 р.), II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 2012 р.), III науково-практичній конференції «Інновації, якість і сервіс у техніці та технологіях» (Курськ, 2012 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны» (Пенза, 2013р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування – очима молодих» (Кременчук, 2013 р.), XIV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Суми, 2014 р.), науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 2015 р.); об'єднаному семінарі кафедр «Загальна механіка і динаміка машин» і «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету (Суми, 2015 р.).

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано 27 друкованих праць, зокрема: 1 монографія (співавтор), 10 статей – у провідних фахових виданнях України, 4 статті – за кордоном (у т. ч. одна стаття у виданні, що індексується наукометричною базою Scopus), 8 тез доповідей на науково-технічних конференціях (зокрема, 5 – на міжнародних), 4 патенти.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та переліку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 225 сторінок, з яких 139 сторінок – основного тексту, 46 рисунків – на 26 сторінках, 22 рисунки – за текстом, 8 таблиць – за текстом, 4 додатки – на 37 сторінках, список використаних джерел із 206 найменувань – на 23 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її наукову новизну та практичну значущість.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасних методів і способів контролю динамічної поведінки обробних систем та визначення їх ресурсу, а також сучасних систем збору та обробки інформації. Було виявлено ряд вимог, які повинні ставитися до розроблюваних методів визначення ресурсу та мікропроцесорних комплексів, що реалізують їх на практиці реального виробництва.

У працях учених: Б. М. Бржовського, В. Л. Заковоротного, В. Ц. Зориктуєва, В. І. Подураєва, А. А. Барзова, О. В. Кретиніна, Ю. Г. Кабалдіна, Т. Н. Лоладзе, А. Д. Макарова, Е. М. Трента, а також зарубіжних вчених М. Полачека, І. Глустого, С. Тобайяса, Х. Б. Мерріта та ін., розроблені методи контролю динамічної поведінки обробних систем на основі таких інформаційних сигналів, як акустична емісія, вібрація, компоненти сили різання, електричні параметри та ін.

Значний внесок у цю проблематику роблять і українські вчені та дослідники: Ю. М. Внуков, В. О. Залога – у галузі металообробного обладнання, А. П. Зіньковський, Г. В. Цибаньов – у галузі динаміки та міцності машин, В. А. Марцинковський і В. І. Симоновський – у галузі динаміки роторних машин та ін. Однак, незважаючи на досить велику бібліографію із цієї тематики, багато теоретичних і практичних проблем ще однозначно не вирішені.

Так, серйозним обмеженням проведених досліджень є той факт, що вони спрямовані, як правило, на одночасний контроль динамічної поведінки лише якогось одного елемента обробної системи – інструменту, оброблюваної деталі або верстата. Проблема ускладнюється ще й тим, що для обробних систем відсутні норми, які б регламентували за результатами вимірювання непрямих інформаційних сигналів ступінь критичності динамічної поведінки обробної системи. У той самий час динаміка цих систем під час їх функціонування залежить від великої кількості неоднакових за значущістю факторів. Тому моделі, що описують поточний стан обробних систем та прогнозують його подальший розвиток, працюють лише за тих технологічних умов, за яких проводилися експерименти. У разі використання інших технологічних умов доводиться повністю повторювати експеримент, що є не завжди прийнятним для широкого практичного використання в конкретних завданнях визначення ресурсу та прийняття рішень, особливо під час використання обробної системи в умовах автоматизованого виробництва. Непередбачуваний вихід системи з ладу до завершення технологічного завдання призводить до появи непоправного браку виробу, що виготовляється, або додаткових витрат на його виправлення. На сьогодні, коли необхідне широке використання автоматизованих обробних систем

(верстатів із ЧПК, багатоцільових обробних центрів тощо), існує гостра потреба в розробленні сучасної системи контролю їх динамічної поведінки та визначення їх ресурсу в режимі реального часу незалежно від типу системи керування обробною системою. На підставі проведеного аналізу визначено мету та основні завдання наукового дослідження.

**Другий розділ** присвячений розробленню методик проведення експериментальних досліджень та математичному моделюванню, що на базі цього здійснюється. При цьому, зокрема, показано, що для контролю динамічної поведінки обробних систем найбільш підходять безконтактні методи вимірювання інформаційного сигналу, що супроводжує їх роботу. Причому як датчик запропоновано використовувати мікрофон, застосування якого дозволяє значною мірою виключити перешкоджаючий вплив на корисний сигнал, що виникає в робочій зоні обробних систем, паразитних вібрацій, які генеруються працюючими вузлами верстата.

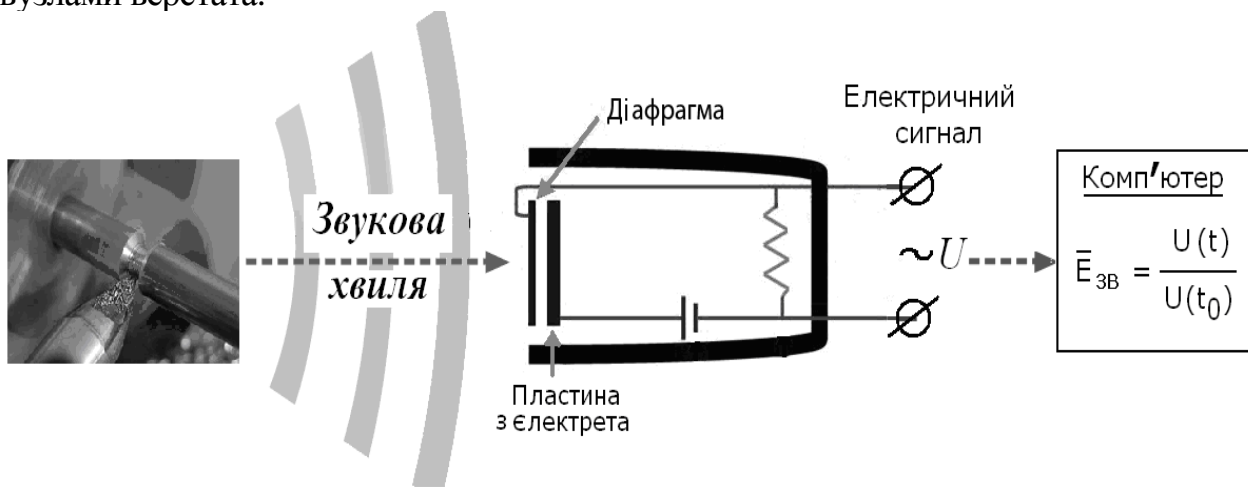


Рисунок 1 – Реєстрація звукової хвилі за допомогою мікрофона

Мікрофон перетворює параметри звукової хвилі як інформаційного сигналу на відповідні змінні за знаком параметри електричного сигналу. Дослідження засвідчили, що параметри цього інформаційного сигналу з необхідною повнотою описують динамічну поведінку обробної системи, тому він і розглядається далі в цій роботі.

Амплітуда звукової хвилі  $E_{зв}$ , Па пов'язана з амплітудою коливання частинок повітряного середовища  $A$ , м, таким співвідношенням:

$$E_{зв} = 2\pi f \cdot \rho c A, \quad (1)$$

де  $f$  – частота коливань поверхні, Гц;  $c$  – швидкість поширення звуку в повітряному середовищі, м/с;  $\rho$  – густина повітряного середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Колівання частинок середовища  $A$ , у свою чергу, повторюють просторові коливання  $\zeta_i$  елементів обробної системи.

Ці коливання досліджували за допомогою динамічних моделей для підтвердження та узагальнення відомої з практики особливості динамічної поведінки обробної системи при погіршенні її стану у міру зношення її основних конструктивних елементів.

*Предметом досліджень* були динамічні моделі обробної системи токарного верстата типу 16K20T1 (рис. 2) і фрезерного верстата типу 6P13 (рис. 3). Моделі являли собою пружно-масові схеми із зосередженими параметрами, що відображали конструктивно-компонувальну схему обробної системи модельованих

верстатів. Коливання моделей описували системою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

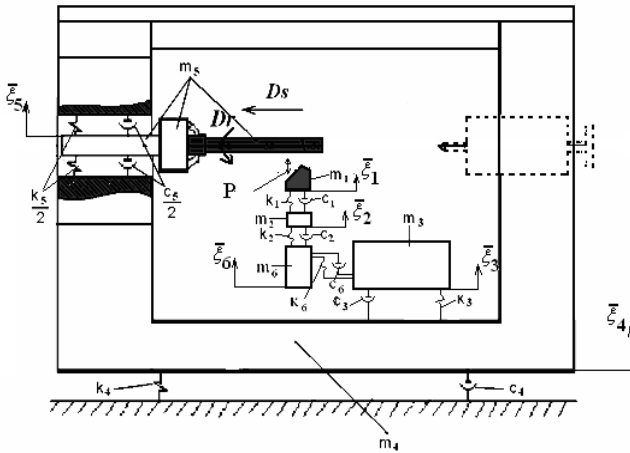


Рисунок 2 – Динамічна модель обробної системи токарного верстата

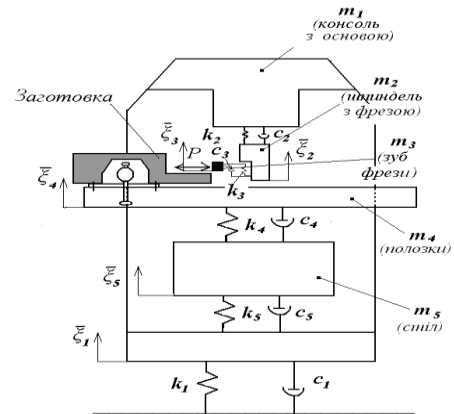


Рисунок 3 – Динамічна модель обробної системи фрезерного верстата

У матричній формі ця система рівнянь має такий вигляд:

$$[M][\ddot{\Xi}] + [C][\dot{\Xi}] + [K][\Xi] = [P(\tau)], \quad (2)$$

де  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ ,  $[\Xi]$  – матриці відповідно коефіцієнтів інерції, демпфірування, жорсткості та переміщення динамічної моделі;  $[P(\tau)]$  – матриця збудовальної дії на модель, причиною якої є зміна технічного стану різального інструменту.

У збудовальну силу в розрахунках розглядали змінну частину сили різання. Причиною появи цієї сили є вібраційні процеси, що супроводжують роботу обробної системи. Амплітуда збудовальної сили  $P_0$ ,  $H$  визначали за формулою Герца:

$$P_0 = \frac{4}{3} \left( \frac{E_o E_i}{(1 - \mu_o^2) E_i + (1 - \mu_i^2) E_o} \right) \sqrt{\frac{-r_o r_e}{-r_o + r_e}} \Delta^{1.5}, \quad (3)$$

де  $E_o$  і  $E_i$  – модуль пружності відповідно матеріалів заготовки ( $E_o = 2,1 \cdot 10^{11} Pa$ ) та інструменту ( $E_i = 6,3 \cdot 10^{11} Pa$ );  $\mu_o$  і  $\mu_i$  – коефіцієнт Пуассона відповідно матеріалів заготовки та інструменту;  $r_o$  і  $r_e$  – радіуси відповідно сліду від різця на обробленій поверхні заготовки та вершини леза інструменту,  $mm$ ;  $\Delta$  – відстань, на яку зближуються лезо й деталь під впливом змінної частини сили різання ( $\Delta = R_z$ , де  $R_z$  – параметр шорсткості),  $mkm$ .

Параметр  $R_z$ ,  $mkm$ , подача  $S$ ,  $mm/об$ , і радіус вершини леза інструменту  $r_e$ ,  $mm$ , пов'язані між собою відомим виразом:

$$R_z = 125 \cdot \frac{S^2}{r_e}. \quad (4)$$

У разі зношування радіус вершини леза інструменту  $r_e$ , збільшується, а коли починаються викришування, він може зменшуватися. Математично цей комбінований процес запропоновано описувати так:

$$r_e(\tau) = \left[ r_{e0} + (\gamma - 1) r_{e0} \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_3 - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[ 1 - (1 - \eta) \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_e - \tau_0} \right)^\beta \right], \quad (5)$$

де  $r_{e0}$  – початковий радіус вершини леза інструменту;  $T_3$ ,  $T_e$  – ресурс інструменту,  $xв$ , обмежений відповідно граничним зношенням і викришуванням;  $\tau_0$ ,  $\tau$  – напрацювання інструменту,  $xв$ , відповідно на момент початкового та поточного контролів його стану;  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – безрозмірні параметри моделі.



З урахуванням (4) і (5) вираз (3) набирає вигляду

$$P_O = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left( \frac{E_o E_i}{E_i + E_o} \right) \frac{S^3}{\left[ r_{e0} + (\gamma-1) r_{e0} \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_s - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[ 1 - (1-\eta) \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_e - \tau_0} \right)^\beta \right]}. \quad (6)$$

Результати досліджень наведені на рис. 4 а) і 4 в) у вигляді тренду параметра  $\bar{E}_{3\phi}$  амплітуди звукової хвилі (далі – тренду звуку). Параметр  $\bar{E}_{3\phi}$  є безрозмірною величиною, що дорівнює відношенню поточного значення амплітуди звукової хвилі  $E_{3\phi}(\tau)$  (електричного сигналу на виході мікрофона  $U(t)$ ) до її первісної величини  $E_{3\phi}(\tau_0)$  (величини електричного сигналу на виході мікрофона  $U(t_0)$ ), зареєстрованої при першому вимірюванні параметрів звукової хвилі (рис. 1). Така форма подання цього параметра дозволяє абстрагуватися від його абсолютного значення та зосередити увагу на контролі його тренду. На рисунках для порівняння нанесено як розрахунковий параметр  $\bar{E}_{3\phi}^P$ , так і параметр  $\bar{E}_{3\phi}^\Phi$ , одержаний експериментально.

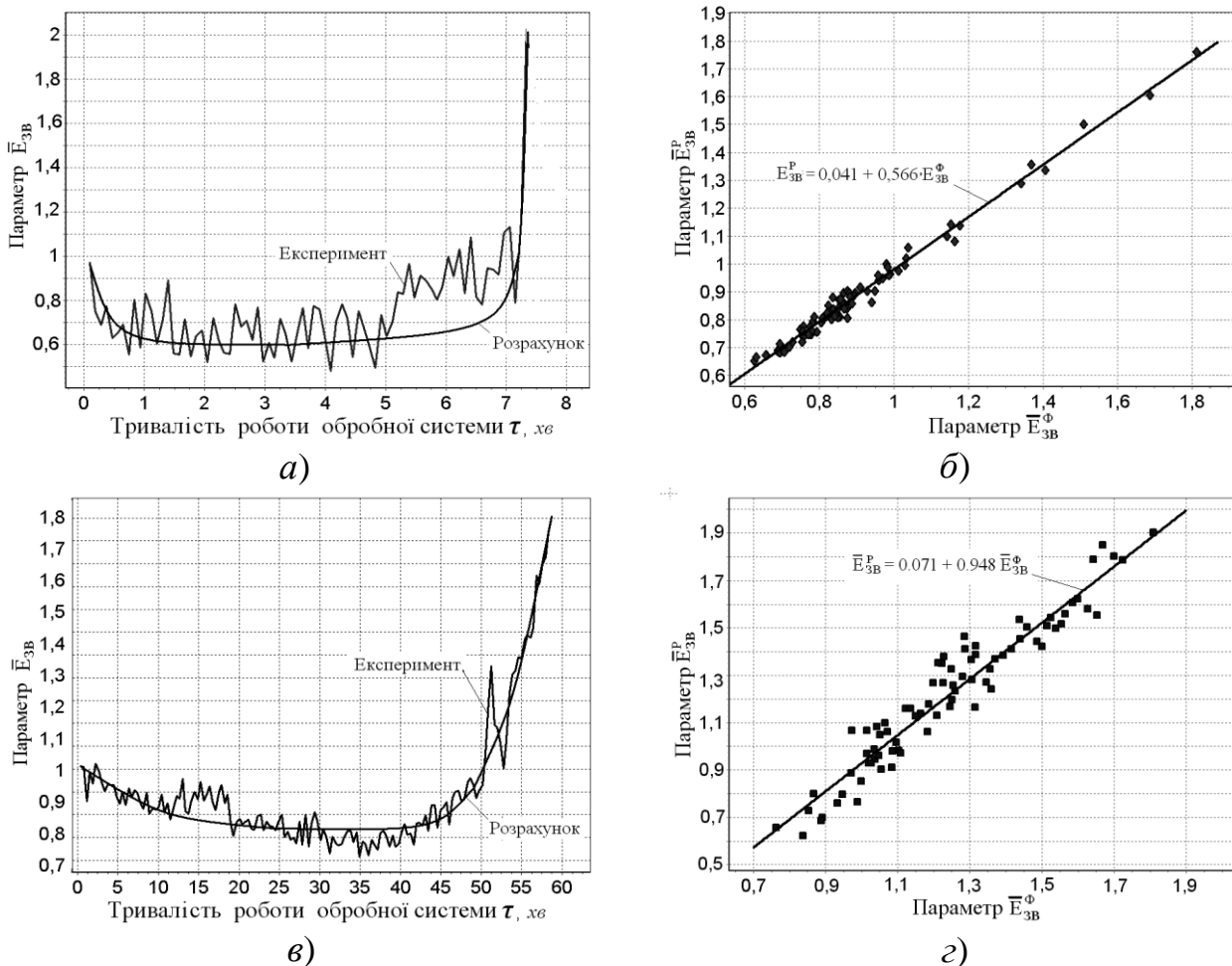


Рисунок 4 – Розрахункові та фактичні тренди визначального параметра  $\bar{E}_{3\phi}$ , зафіксовані під час роботи обробних систем токарного (а) і фрезерного (в) верстатів та лінії регресійної залежності розрахункових і фактичних значень параметра  $\bar{E}_{3\phi}$  для токарного (б) і фрезерного (з) верстатів

Лінії регресії між фактичним і розрахунковим трендами параметра  $\bar{E}_{3\phi}$  показані на рис. 4 б) і 4 з).

Коефіцієнт кореляції  $R$  між ними досить великий і становить під час

роботи обробної системи токарного верстата 0,993, фрезерного верстата – 0,965. Високий рівень кореляції свідчить про адекватність опису моделями поведінки реальної обробної системи в процесі зміни з часом її стану.

Розрахунками доведено, що тренд звука  $\bar{E}_{зв}$  складається з ділянки повільної зміни та ділянки з досить різкою його зміною. Перша ділянка відповідає періоду нормальної експлуатації обробної системи, а друга – свідчить про наближення моменту відмови (аварії) системи і вимагає її зупинення.

Результати математичного моделювання динамічної поведінки обробних систем підтвердили та узагальнили відомі з практики їх експлуатації й попередніх наукових досліджень знання про динамічну поведінку даних механічних систем залежно від зміни у часі технічного стану (зношення) їх елементів. Моделювання, а також попередні дослідження підтверджують правомірність вибору параметра  $\bar{E}_{зв}$  звукової хвилі як вхідної контрольованої величини, що адекватно описує динамічну поведінку обробних систем.

Результати моделювання, описаного у цьому розділі, були основою для здійснення наступного етапу дисертаційних досліджень, метою яких було розроблення методу визначення ресурсу обробних систем.

У **третьому розділі** на підставі аналізу результатів попереднього розділу та розгляду прийнятих методів визначення ресурсу механічних систем розроблено метод визначення ресурсу обробних систем. Основою методу було застосування моделі (далі – прогнозна модель), що дозволяє меншою кількістю змінних, однак із не меншою ефективністю описувати тренд звука  $\bar{E}_{зв}$ . Прогнозна модель, будучи функцією часу, вміщує у своїй математичній структурі параметри, числове значення яких характеризує напрацювання обробної системи до відмови.

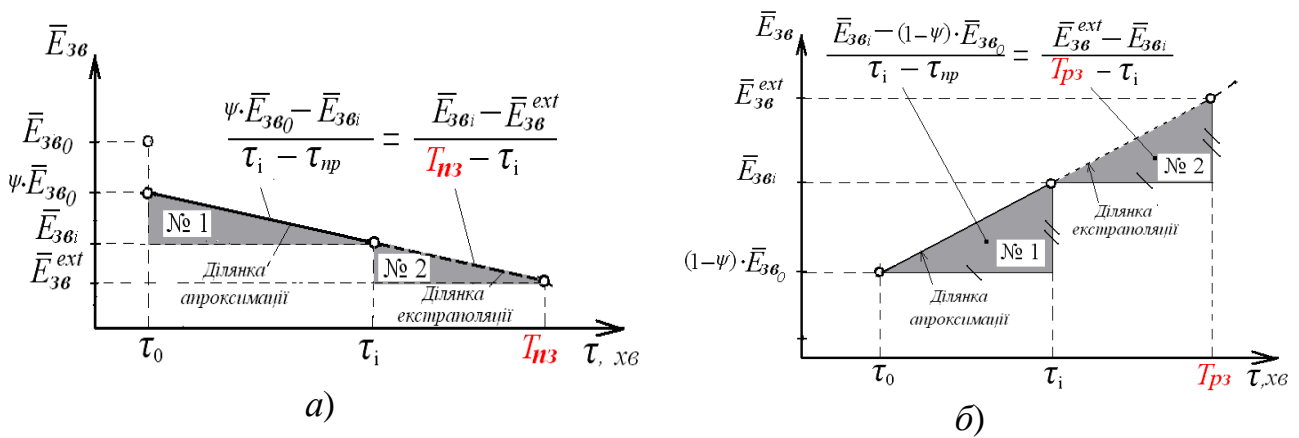


Рисунок 5 – Пропорції між ділянками апроксимації та екстраполяції тренду параметру  $\bar{E}_{зв}$  на ділянках: а) його сталої зміни; б) його різкої зміни

Числове значення ресурсу визначається шляхом параметричної ідентифікації прогносної моделі за результатами контролю тренду звука  $\bar{E}_{зв}$ , що описує динамічну поведінку обробної системи впродовж виконання даної технологічної операції:

$$\bar{E}_{зв} = \psi \left( 1 - \gamma \cdot \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_{пз} - \tau} \right)^\eta \right) + (1 - \psi) \left( 1 + \alpha \cdot \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_{пз} - \tau} \right)^\beta \right) \quad (7)$$

де  $\tau_0, \tau$  – початкове та поточне напрацювання,  $хв$ ;  $T_{пз}, T_{пз}, \psi, \alpha, \beta, \gamma, \eta$  – параметри, що визначаються у процесі ідентифікації прогносної моделі за результатами контролю тренду звука  $\bar{E}_{зв}$ .

Математичною основою моделі є пропорції, що встановлюють взаємозв'язок між ділянкою апроксимації відомих даних про тренд звука  $\bar{E}_{3\phi}$  та ділянкою екстраполяції тренду до моменту відмови обробної системи (рис. 5). Пропорцію складала, виходячи з твердження К. Шеннона про те, що «основні закономірності, які спостерігалися в минулому, будуть збережені і в майбутньому».

Прогнозна модель (7) являє собою суму двох дробово-раціональних ступеневих функцій. Ці функції, як правило, використовуються на відміну від поліномів для апроксимації експериментальних даних, що різко змінюються за величиною у процесі спостереження за ними. Динамічна поведінка обробних систем у процесі їх експлуатації якраз і характеризується подібними різкими змінами. Числове значення ресурсу  $T_{np}$  знаходиться за формулою

$$T_{np} = \frac{T_{n3} \cdot T_{p3}}{T_{n3} + T_{p3}} \quad (8)$$

При наближенні поточного напрацювання  $\tau$  до величин  $T_{n3}$  або  $T_{p3}$  значення функції (7) різко змінюється, відстежуючи аналогічну зміну контрольованого тренду звука  $\bar{E}_{3\phi}$ , що забезпечує високу чутливість моделі до зміни динамічної поведінки обробної системи. Прогнозна модель дозволяє визначати ресурс обробної системи на всіх ділянках її динамічної поведінки і на основі цього своєчасно приймати рішення про доцільність її подальшої роботи або про необхідність коригування процесу функціонування системи для запобігання її несанкціонованій відмові.

Ресурс визначається на основі параметричної ідентифікації моделі (7) за результатами контролю тренду звука  $\bar{E}_{3\phi}$  шляхом мінімізації відхилення графіка моделі від фактичного тренду звука:

$$U(\bar{E}_{3\phi}, T_{n3}, T_{p3}, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \psi) = \sum_i^m \left[ \bar{E}_{3\phi i}^{\phi} - \bar{E}_{3\phi i}^p(E_{3\phi}, T_{n3}, T_{p3}, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \psi) \right]^2, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість вимірювань параметра  $\bar{E}_{3\phi}$ , проведених за весь час контролю динамічної поведінки обробної системи при виконанні заданого технологічного процесу;  $\bar{E}_{3\phi i}^{\phi}$ ,  $\bar{E}_{3\phi i}^p(E_{3\phi}, T_{n3}, T_{p3}, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \psi)$  – відповідно фактичні та розрахункові значення контрольованого параметра  $\bar{E}_{3\phi}$ .

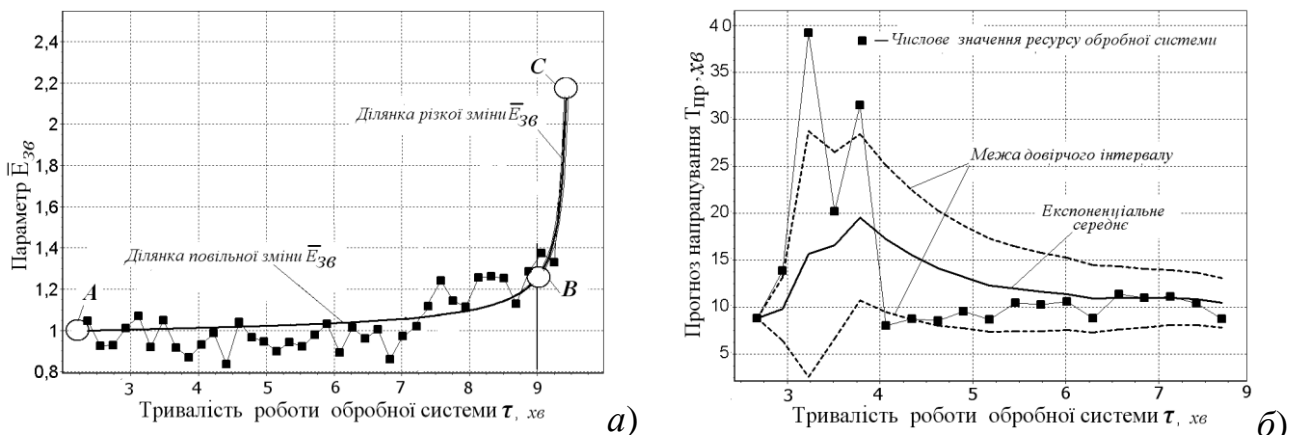


Рисунок 6 – Апроксимація графіком прогнозної моделі (7): а) тренда звука  $\bar{E}_{3\phi}$ , зареєстрованого у процесі роботи обробної системи токарного верстата; б) визначення ресурсу напрацювання системи до її відмови (заміни різального інструменту)

Приклади апроксимації графіком прогнозної моделі експериментальних даних та визначення на цій основі ресурсу обробної системи наведені на рис. 6.

Бачимо, що графік прогнозної моделі досить добре апроксимує експериментальні дані, про що свідчить оцінювання статистичної значущості прогнозної моделі, яке показало, що коефіцієнти моделі згідно з  $F$ -критерієм Фішера статистично значущі, коефіцієнт кореляції між фактичним трендом звука  $\bar{E}_{3\epsilon}$  і графіком прогнозної моделі становив:

- на ділянці повільної зміни параметра звукової хвилі  $\bar{E}_{3\epsilon} - 0,852$ ;
- на ділянці різкої зміни параметру звукової хвилі  $\bar{E}_{3\epsilon} - 0,903$ .

На рисунку 6 б показано зміну числової величини ресурсу залежно від тривалості роботи обробної системи, експоненціальне середнє значення даної величини і довірчі межі, куди з імовірністю 0,95 це експоненціальне середнє значення вкладається. З графіка випливає, що похибка визначення ресурсу, починаючи із середини терміну спостереження за обробною системою, не перевищує 5 %.

«Спосіб визначення ресурсу інструменту та його зношення в режимі поточного часу» захищений Патентом України № 91643 від 10.07.14 р.

У четвертому розділі описується розроблення і програмна реалізація методики контролю в режимі реального часу динамічної поведінки обробних систем. У відповідність з методикою ступінь критичності динамічної поведінки цих систем оцінюється по вектору (набору) показників стану, числові значення яких у відповідності з теорією «нечітких множин», розраховуються за допомогою «функцій належності» (табл. 1). У перелік показників входить показник якості обробки деталі  $a_{як}$  і показники технічного стану інструменту  $a_{ін}$  та верстата  $a_в$ .

Таблиця 1 – «Функції належності», за допомогою яких розраховуються показники стану обробної системи

Елемент обробної системи	Показник стану	
	характеризує	«функції належності»
Деталь	якість обробки	$a_{як} = \varphi \cdot \bar{E}_{3\epsilon}(\tau) \frac{\tau}{T_{np}} + (1 - \varphi) \cdot \bar{E}_{3\epsilon}(\tau)$
Інструмент	зношення робочих поверхонь	$a_{зн} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^{\eta}}{(\tau - \tau_0)^{\eta} + (T_{пз} - \tau)^{\eta}} + (1 - \varphi) \frac{T_{нор}}{T_{пз}}$
	викришування різальних кромки	$a_{вк} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^{\beta}}{(\tau - \tau_0)^{\beta} + (T_{пз} - \tau)^{\beta}} + (1 - \varphi) \frac{T_{нор}}{T_{пз}}$
	комплексний вплив зношення і викришування	$a_{ін} = a_{зн} + a_{вк} - a_{зн} \cdot a_{вк}$
Верстат	ступінь розвитку дефектів верстата	$a_в = \varphi \bar{A} + (1 - \varphi) \bar{V}$

Примітки:  $\bar{A} = \frac{A_в(\tau) - A_в(\tau_0)}{A_в(T_{np}) - A_в(\tau_0)}$ ;  $\bar{V} = \frac{T_{нор}}{T_{пз}}$ ;  $\varphi = 0,1 \dots 0,9$  - ваговий коефіцієнт;

$T_{нор}$  – нормативний ресурс обробної системи.

«Функції належності» трансформують значення вхідних змінних (параметр  $\bar{E}_{3\epsilon}$ , рівень вібрації вузлів верстата  $A_в$ , поточне напруження обробної системи  $\tau$  і ресурс  $T_{np}$ ) в значення лінгвістичних змінних «термів» -

характеристик поточного стану об'єкта контролю. Лінгвістична змінна, названа «показником стану об'єкта контролю», має ряд значень - «термів». «Терми» представляють собою набір вербальних величин, що описують якість стану об'єкта контролю, яка поступово погіршується. У табл. 2 наведені інтервали, в яких змінюються числові значення «термів». Межі інтервалів представляють нормалізований ряд бажаних чисел  $R_5$ .

Таблиця 2 – Базова шкала лінгвістичної змінної «Показник ступеня критичності динамічної поведінки обробної системи»

Вербальні значення «термів»				
Гарний стан	Прийнятний стан	Допустимий стан	Потрібно підналагодження	Неприпустимий стан
0 – 0.41	0.41 – 0.63	0.63 – 0.9	0.9 – 1.0	> 1.0

Якість обробки деталі визначається точністю геометрії деталі і якістю (шорсткістю) обробленої поверхні. Тому показник якості визначається як зважена сума цих показників з наступного виразу:

$$a_{\text{як}} = \varphi \cdot a_{\text{точ}} + (1 - \varphi) \cdot a_{\text{ш}}, \quad (10)$$

де  $\varphi$  – ваговий коефіцієнт ( $\varphi = 0,1 \dots 0,9$ ).

Величина вагового коефіцієнта  $\varphi$  встановлюється залежно від пріоритетів, яким має відповідати якість обробки.

Для отримання аналітичного виразу «функції належності» показника точності  $a_{\text{точ}}$  скористалися методами теорії подібності та розмірності. Відповідно до цієї теорії вважали, що показник точності описується наступним набором визначальних параметрів: початковим і поточним зношенням різального інструменту, поточним напрацюванням обробної системи  $\tau$  і значенням її ресурсу  $T_{\text{пр}}$ . При цьому врахували розглянуту в розд. 2 тісну кореляцію зношення інструменту і амплітуди звукової хвилі. У результаті перетворень отримано наступний вираз для «функції належності» показника

$$\text{точності: } a_{\text{точ}} = \bar{E}_{\text{зв}}(\tau) \cdot \frac{\tau}{T_{\text{пр}}}.$$

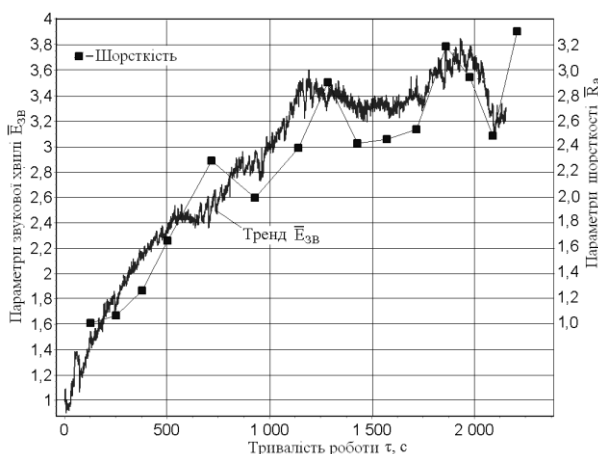


Рисунок 7 – Порівняння параметра  $\bar{E}_{\text{зв}}$  і відносною величини параметра шорсткості  $\bar{R}_a$

Щоб одержати вираз для «функції належності», за якою визначається величина показника шорсткості  $a_{\text{ш}}$ , були проведені спеціально поставлені експерименти, що дозволили встановити тісну кореляцію між відносною величиною амплітуди звукової хвилі  $\bar{E}_{\text{зв}}$  і відносною величиною параметра шорсткості  $\bar{R}_a$  (кореляція  $R$  дорівнює 0.96, рис. 7). Це дозволило представити «функцію належності» для цього показника у такому вигляді:  $a_{\text{ш}} = \bar{E}_{\text{зв}}(\tau)$ .

Остаточний вираз для показника якості обробки деталі  $a_{\text{як}}$  наведено в табл. 1.

Таким чином, було доведено принципову можливість непрямого контролю

якості обробки деталі з використанням інформаційного параметра  $\bar{E}_{36}$ . «Спосіб визначення шорсткості поверхні деталі при металообробці» захищений Патентом України № 92424 від 11.08.14 р.

При розробці методики вважалося, що ступінь критичності технічного стану інструменту і вузлів верстата непрямо оцінюється як за ступенем, так і по швидкості зміни інформаційного параметра, спостережуваного протягом роботи обробної системи. Аналітичні вирази для «функцій належності», в число аргументів яких у вигляді доданків з ваговими коефіцієнтами входять два параметри, перший з яких характеризує відносну зміну, а другий – швидкість зміни амплітуди звукової хвилі, наведені в табл. 1.

Для впровадження в практику виробництва методики контролю динамічної поведінки обробних систем та методу визначення на цій основі їх ресурсу розроблено програмний продукт, який використовують як програмне забезпечення контрольного (мікропроцесорного) пристрою (рис. 8).

Програмний продукт реалізовано алгоритмічною мовою JAVA і розраховано на комп'ютерний пристрій, що працює на платформі Android.

Програмний продукт забезпечує:

- керування процесом збору вхідної інформації, необхідної для подальшого її аналізу;
- оперативну обробку в режимі поточного часу масиву зареєстрованої інформації;
- оцінювання якості обробки деталі;
- визначення ресурсу обробної системи;
- обчислення часу напрацювання верстата до підналагодження або ремонту із зазначенням причини цього ремонту;
- подання звукового сигналу, що попереджує настання граничного стану інструменту, верстата або появу браку деталі;
- видачу результатів контролю на екран мікропроцесорного пристрою та їх архівацію у вигляді текстового файлу.



Рисунок 8 – Макет контрольного пристрою на базі ноутбука

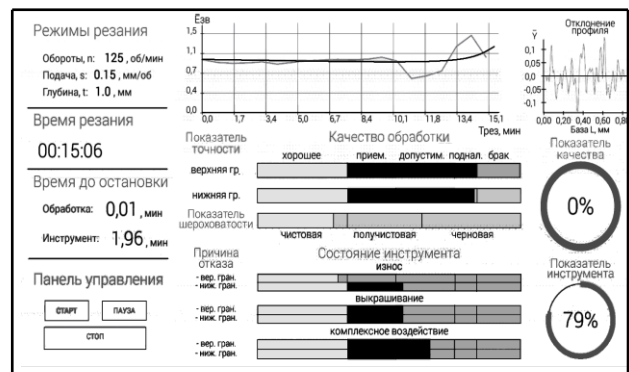


Рисунок 9 – Інформація, що відображається на екрані контрольного пристрою

Результат роботи програми виводиться на екран пристрою у вигляді кольорових смуг (рис. 9). Колір смуг змінюється від синього до червоного в міру погіршення якості обробки, стану інструменту і верстата. Там само наводяться тренд звука  $\bar{E}_{36}$ , графік прогнозної моделі (7) і профіль шорсткості.

«Мікропроцесорна система вимірювального контролю віброакустичних параметрів» захищена Патентами України № 92987 від 10.09.14 р. та № 91643 від 10.07.14 р.

Працездатність розробленого алгоритму та його програмної реалізації була перевірена як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

У **п'ятому розділі** наведено результати експериментальної апробації алгоритму та його програмної реалізації на прикладі контролю динамічної поведінки обробної системи токарного верстата. Завданнями експерименту були:

– експериментальне підтвердження результатів проведеного у розділі 2 математичного моделювання особливостей динамічної поведінки у часі обробної системи;

– апробація розробленого в розділі 3 методу визначення ресурсу обробної системи; перевірка ефективності використання показників стану для оцінювання якості функціонування обробної системи.

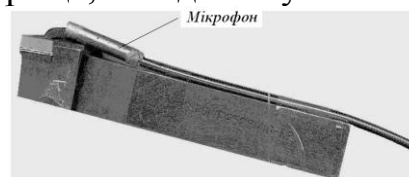
Таблиця 3 – Режими роботи обробної системи

Режим роботи				Матеріал	
Оберти шпинделя $n$ , об/хв	Швидкість різання $V$ , м/хв	Глибина різання $t$ , мм	Подача $S$ , мм/об	Твердий сплав	Заготовка Ø100 мм
315	157	1,0	0,20	T15K6	12X18H9T

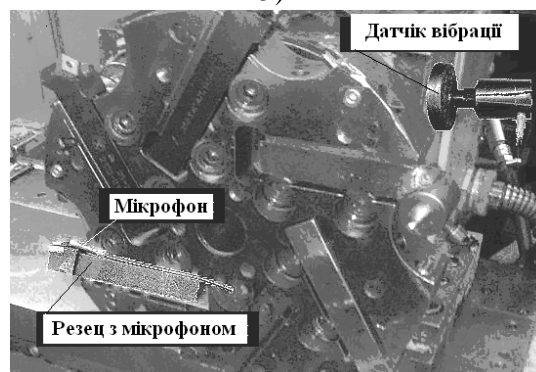
Експерименти проводили на токарному верстаті 16K20T1 (рис. 10) на режимах, матеріалах заготовки і різальної частини різця, наведених у табл. 3.



а)



б)



в)

Рисунок 10 – Реєстрація інформації на обробній системі токарного верстата:

- а) загальний вигляд експериментальної установки; б) розміщення мікрофона на різці; в) розміщення датчика вібрації і мікрофона в складі різця на револьверній головці

Результати експериментів наведені на рис. 11 – 13. На рисунку 11 наведено інформацію про зміну у часі показника якості, яка свідчить про те, що показник якості функціонування обробної системи (показник якості обробки  $a_{як}$ ) досягає свого гранично допустимого значення, що дорівнює одиниці, якраз у момент закінчення бездефектної роботи обробної системи (15 хв).

На рисунку 12 наведено графік зміни показника шорсткості обробленої

поверхні деталі, який свідчить про те, що якість обробки за час роботи технологічної системи поступово погіршувалася.

На рисунку 13 наведено тренд звуку  $\bar{E}_{зв}$ , зареєстрованого в експерименті. На рисунку також показаний «скріншот» екрана пристрою в момент вичерпання ресурсу обробної системи, про що свідчить червоний колір індикатора, що описує якість обробки деталі.



Рисунок 11 – Зміна за час роботи обробної системи показника якості обробки виробу на режимах, наведених у табл. 3



Рисунок 12 – Зміна за час роботи обробної системи показника шорсткості обробленої поверхні на режимах, наведених у табл. 3

Момент часу, що відповідає переходу від бездефектного функціонування обробної системи до дефектного, позначений на тренді колом, а момент відмови (поява браку деталі) – квадратом.

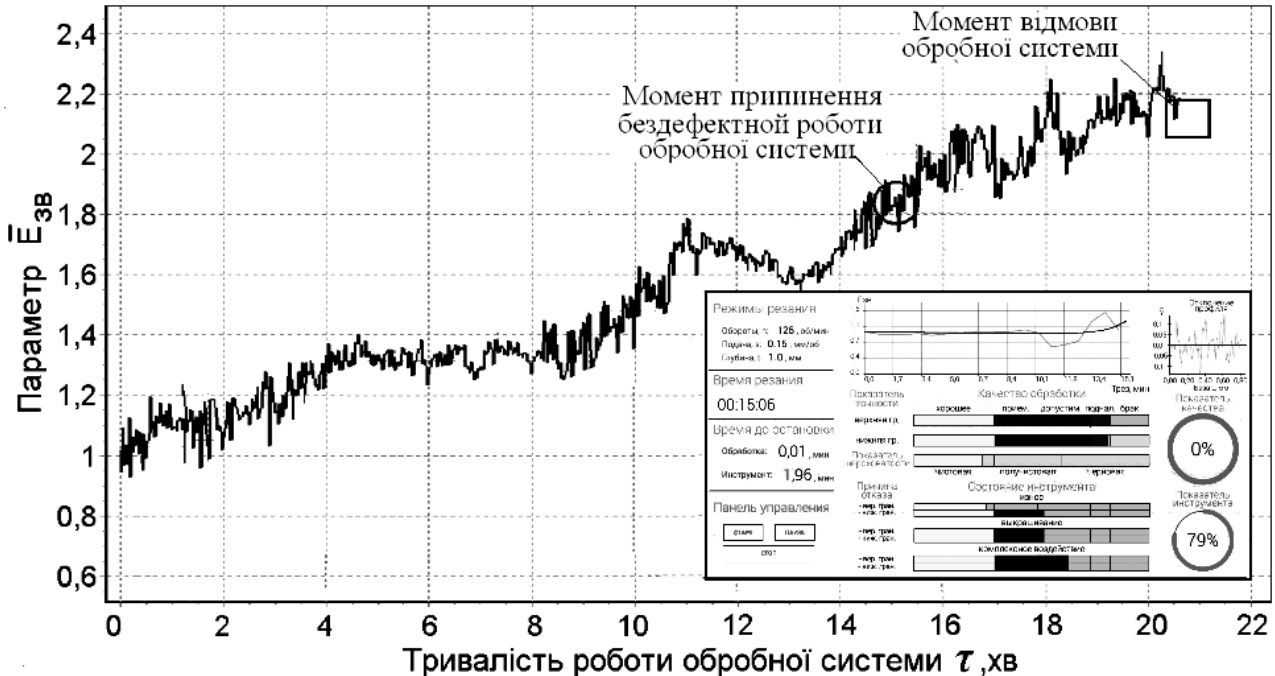


Рисунок 13– Тренд звуку  $\bar{E}_{зв}$  та індикація зміни динамічної поведінки обробної системи на моніторі мікропроцесорного пристрою під час роботи системи на режимах, наведених у табл. 3

Таким чином, результати експериментів свідчать про ефективність закладеного в програмному забезпеченні мікропроцесорного пристрою алгоритму контролю динамічної поведінки обробної системи, що забезпечує безпосередньо в процесі її роботи безперервний контроль тренду звуку  $\bar{E}_{зв}$ ,



первинну обробку зареєстрованого інформаційного сигналу (амплітуди звукової хвилі) та його подальший аналіз, що дозволяє щосекунди оновлювати інформацію про динамічну поведінку обробної системи, оцінювати якість виконання технологічного процесу, визначати період бездефектної експлуатації системи та коригувати на цій основі режими її роботи.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі на прикладі технологічних металообробних систем вирішене важливе науково-технічне завдання визначення фактичного ресурсу механічної системи за результатами оперативного контролю тренду інформаційного сигналу, що супроводжує роботу системи, відображаючи індивідуальні особливості динамічної поведінки системи впродовж контрольованого терміну її експлуатації і подальшої параметричної ідентифікації на основі цієї інформації прогнозної моделі, числові значення одних із коефіцієнтів якої дорівнюють напрацюванню даної системи до її відмови.

1. Огляд літературних даних засвідчив, що для контролю динамічної поведінки металообробної технологічної системи і визначення ступеня її критичності використовують непрямі методи спостереження. Але для обробних систем норми, які б регламентували за величиною непрямой ознаки ступінь критичності їх динамічної поведінки, відсутні. Таке положення проблеми обумовило мету проведених у роботі досліджень, що дозволили встановити високий рівень кореляції між характеристиками звукової хвилі, яка генерується в робочій зоні обробної системи, і характеристиками якості й точності функціонування обробної системи. Наявність цієї кореляції дозволила застосувати, використовуючи мікрофон, безконтактний метод спостереження за коливаннями обробної системи і провести на базі цих досліджень математичне моделювання динамічної поведінки обробної системи для узагальнення відомих з практики та попередніх досліджень закономірностей поведінки цієї системи при деградації її технічного стану.

2. Результати математичного моделювання динамічної поведінки обробної системи показали, що тренд інформаційного параметра (відносної величини звукової хвилі) має дві характерні ділянки: ділянку повільної зміни і ділянку його різкого зростання. Це дало підставу для вибору аналітичного виразу для прогнозної моделі у вигляді суми двох дробово-раціональних ступеневих функцій, які математично описують ці ділянки тренду, що відповідає реальній поведінці на них обробної системи. При цьому ресурс, який необхідно знайти, вміщено в математичну структуру прогнозної моделі у вигляді числового значення її коефіцієнтів, його розраховують при параметричній ідентифікації моделі за результатами контролю тренду інформаційного параметра. Оцінювання статистичної значущості прогнозної моделі показало, що коефіцієнти моделі згідно з  $F$ -критерієм Фішера статистично значущі, коефіцієнт кореляції між фактичним трендом параметра, зафіксованого під час роботи обробної системи токарного верстата, і графіком прогнозної моделі становив: на ділянці повільної зміни тренда – 0,852; а на ділянці його різкої зміни – 0,903. Похибка визначення ресурсу обробної системи при цьому з імовірністю 0,95 не перевищує 5 %.

3. Для формалізації процедури контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем розроблені та експериментально апробовані узагальнені критеріальні вирази – показники стану. Ці показники, одержані методами теорії «нечітких множин», дозволили кількісно описати і віднести з точки зору динаміки різні технологічні умови роботи обробних систем

до ряду стандартних, що є основою для цілеспрямованого вибору режиму роботи обробних систем для продовження у заданих межах терміну їх бездефектної роботи, а впорядкованість числових значень цих показників дозволяє розглядати їх як норми динамічної поведінки обробних систем, що компенсує відсутність на сьогодні відповідної нормативної документації.

4. Для упровадження в практику виробництва алгоритму контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем розроблено програмний продукт, апробація якого у складі мікропроцесорного пристрою, що була проведена в лабораторних і виробничих умовах, довела його спроможність до реєстрації інформаційних сигналів в режимі реального часу і здійснення подальшої їх обробки для безперервного спостереження за динамічною поведінкою обробних систем, визначення їх ресурсу та оцінювання на цій основі якості їх роботи. Дослідна експлуатація мікропроцесорного пристрою в умовах реального виробництва на ПАТ «Сумське машинобудівне НВО» та у ТОВ «ТРИЗ» ЛТД показала, що програмний продукт у складі цього пристрою дозволяє в умовах обох виробництв:

- економити до 10 % часу роботи обробної системи, що традиційно витрачається на виявлення та заміну її елементів, які відмовили;
- не менше, ніж на 10%, підвищити ефективність функціонування технологічної обробної системи, особливо під час виготовлення відповідальних деталей, у тому числі довговимірних і великогабаритних.

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА**

1. Нагорний В.В. Науково-технічні основи забезпечення якості складних виробів під час виготовлення та експлуатації на основі інформації, яка отримана методами технічної діагностики // Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів при самоорганізації процесів проектування, виготовлення та експлуатації / В. О. Залого, К. О. Дядюра, В. В. Нагорний – Суми: Сумський державний університет, 2012. Розд. 6 С. 250–290.
2. Нагорный В.В. Контроль состояния фрезы по звуку, сопровождающему процесс фрезерования / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вестник машиностроения. – 2015. – № 5. – С. 46–49, (*обліковується базою даних Scopus*).
3. Нагорный В.В. Контроль качества функционирования технологической системы / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 7. – С. 39–45.
4. Нагорный В.В. Оптимизация механической обработки адаптивным управлением на основе анализа шума резания / К. А. Дядюра, Р. Н. Зинченко, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3 (13). – С. 63–67.
5. Нагорный В.В. Управление процессом резания металлов на основе информации, получаемой методами технической диагностики / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут“: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ „ХПІ“. 2008. – № 35. – С. 49–55.
6. Нагорный В.В. Повышение эффективности процесса резания полиграфических материалов на основе диагностики текущего состояния ножа по акустическому сигналу / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Високі технології в машинобудуванні: зб.наук. пр. НТУ «ХПІ». 2008. – Вип. 2(17). –

С. 142-147.

7. Нагорный В.В. Оценка степени износа инструмента методом вибродиагностики / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 88–96.

8. Нагорный В.В. Расчёт индикаторов разрушения режущего инструмента/ В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. – 2012. – № 66. – С. 96–102.

9. Нагорный В.В. Использование вибродиагностики для прогноза стойкости инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технология. Курск, 2012. – № 2, Часть 1. – С.30–38.

10. Нагорный В.В. Исследование колебаний токарного станка. Часть 1. Исследование закономерностей изменения динамики обрабатывающей системы в зависимости от состояния режущего инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 125–136.

11. Нагорный В.В. Обеспечение качества изготовления продукции посредством вибродиагностики / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1 (31). – С. 12–17.

12. Нагорный В.В. Индикаторы состояния режущего инструмента и качества металлообработки / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3 (33). – С. 46–50.

13. Нагорный В.В. Контроль режимов резания на основе виброакустического мониторинга процесса металлообработки / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4 (34). – С. 52–55.

14. Нагорный В.В. Определение стойкости инструмента и степени его износа по уровню звука, сопровождающего процесс резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Металлообработка. С. Петербург. – 2013. – №2 (74). – С. 14–22.

15. Нагорный В.В. Діагностування технічного стану металообробного верстату / В. А. Залого, В. В. Нагорний // Збірник наукових праць. Серія Високі технології в машинобудуванні. Харків, 2014. – № 1. – С.71–79.

16. Нагорный В.В. Розроблення системи технічного діагностування машин / В. В. Нагорний, Г. Ю. Скоропад // Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства: Матеріали Міжнародної наук.- практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (вебінар).– Луганськ, 2010. – С.178–180.

17. Нагорный В.В. Повышение эффективности эксплуатации промышленного оборудования на основе диагностики и прогнозирования наработки его на отказ / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011). Матеріали Першої міжнародної наук. конф.18-20 жовтня 2011р. Збірник тез доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2011.– С.104.

18. Нагорный В.В. Дослідження коливань токарного верстата з метою визначення ресурсу моменту своєчасної заміни різального інструмента / В. О. Залого, В. В. Нагорний// Сучасні технології в промисловому виробництві: Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської наук.-техн. конф., 17-20 квітня 2012 р. – Суми, 2012.–С.74–75.

19. Нагорный В.В. Прогнозирование момента замены режущего инструмента по урону звука, генерируемого процессом резания/ В. А. Залого, В. В. Нагорный // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Материалы III международной науч.-практ. конф., 17-19 мая 2012 р. – Курск, 2012. – С.107–111.

20. Нагорный В.В. Диагностирование состояния режущего инструмента по звуку, сопровождающему процесс резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны: Материалы международной науч.-практ. конф., 5-8 июня 2013 г. – Пенза, 2013. – С. 179–187.

21. Нагорный В.В. Управление режимом механообработки на основе виброакустического контроля процесса резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Машиностроение – глазами молодых: Материалы международной науч.-техн. конф., 30 октября - 1 ноября 2013 г. – Кременьчуг, 2013. – С. 49.

22. Нагорный В.В. Основні принципи оцінки стану технологічної системи і визначення ресурсу її підналагодження / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: Матеріали XIV Всеукраїнської молодіжної наук.-техн. конф., 27–31 жовтня 2014р. – Суми, 2014. – С. 64.

23. Нагорный В.В. Практичне використання апаратно-програмного комплексу для діагностування стану різальних інструментів/ В. А. Залого, В. В. Нагорный, А.М. Тур // Сучасні технології у промисловому виробництві: Матеріали наук.-техн. конф., 14–17 квітня 2015р. – Суми, 2015. – С. 45.

24. Патент UA 91643 U Україна, МПК G01M 7/00 (2014.01). Спосіб вібродіагностики технічного стану металообробного верстата / Залого В. О., Нагорный В. В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № у 2014 01692; заявл. 21.02.14; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13.

25. Патент UA 91817 U Україна, МПК G01N 3/58 (2006.01). Спосіб оцінки зносу та стійкості лезового різального інструмента / Залого В. О., Нагорный В. В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № у 2014 03124; заявл. 27.03.14; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13.

26. Патент UA 92424 U Україна, МПК B23B 25/00 (2014.01). Спосіб визначення шорсткості поверхні деталі при металообробці / Залого В. О., Нагорный В. В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № у 2014 00000; заявл. 03.04.14; опубл. 11.08.14, Бюл. № 15.

27. Патент UA 92987 U Україна, МПК B23Q 11/02 Пристрій для контролю стану технологічної металообробної системи / Залого В. О., Нагорный В. В.; Заявник і патентовласник Сумський державний ун-тет. - № у 2014 04238; заявл. 22.04.14; опубл. 10.09.14, Бюл. № 17.

## АНОТАЦІЯ

**Нагорный В.В. Контроль динамічної поведінки металообробних технологічних систем та метод визначення їх ресурсу.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Сумський державний університет, Суми, 2015.

Робота присвячена актуальній проблемі розвитку методів контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем та розробки методу визначення їх ресурсу. У роботі вперше поставлене і вирішене науково-технічне завдання визначення ресурсу обробної системи безпосередньо в процесі її роботи в умовах, коли «Норми...», які регламентують ступінь критичності динамічної поведінки для даних систем, відсутні. Це завдання вирішене за рахунок того, що розроблена у роботі прогнозна модель вигідно відрізняється від прийнятих тим, що ресурс, який шукається, включено до її математичної структури і визначається в процесі ідентифікації моделі за результатами моніторингу тренда звуку,

супроводжуючого роботу обробних систем. Це дозволило визначати індивідуальний ресурс обробної системи, який відповідає даним технологічним умовам її експлуатації. Для здійснення оперативного контролю динамічної поведінки обробної системи був розроблений алгоритм контролю та його програмна реалізація, яка за допомогою мікропроцесорного пристрою дозволила автоматизувати процес контролю динамічної поведінки обробної системи та визначення її ресурсу.

Методи досліджень: теорії коливальних, ідентифікації та математичної статистики. Розроблення алгоритму контролю здійснювалося на основі методів інформаційних технологій. Аналіз експериментальних даних проводився на основі теорії цифрової обробки сигналів, Для вирішення завдань визначення ресурсу використані методи випадкового пошуку.

**Ключові слова:** контроль, динамічна поведінка, ресурс, ріжучий інструмент, обробні системи, технічний стан, шорсткість, звук, вібрація, мікропроцесорний пристрій.

## АННОТАЦІЯ

**Нагорный В.В. Контроль динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем и метод определения их ресурса – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Сумской государственной университет, Сумы, 2015.

Работа посвящена актуальной проблеме контроля в режиме реального времени динамического поведения обрабатывающих систем и развитию методов определения их ресурса. В работе впервые поставлена и решена научно-техническая задача расчётно-экспериментального исследования динамического поведения обрабатывающих систем в зависимости от изменения технического состояния их элементов (станка, режущего инструмента и детали). Это позволило получить новое решение научно-технической задачи контроля динамического поведения обрабатывающих систем и определения их ресурса в условиях, когда «Нормы...», регламентирующие степень критичности их динамического поведения отсутствуют.

В качестве информационного сигнала, косвенно характеризующего качество функционирования обрабатывающих систем, выбран звук, сопровождающий процесс их работы. Как показали исследования, тренд звукового сигнала подобен кривой износа режущего инструмента, а его временная реализация и частотный спектр, совпадают с профилем шероховатости и ее частотным спектром, что позволяет звуку наиболее полно отражать динамическое поведение обрабатывающих систем.

Разработана прогнозная модель, особенность которой заключается в том, что искомый ресурс обрабатывающей системы включен в ее математическую структуру и определяется при идентификации модели по результатам мониторинга тренда звука, сопровождающего процесс работы обрабатывающей системы. Получены расчетные зависимости для показателей состояния, позволяющих в понятиях теории нечетких множеств отнести с точки зрения

динамики разнообразные технологические условия работы обрабатывающих систем к ряду стандартных, что послужило основой для разработки алгоритма контроля динамического состояния обрабатывающей системы. Процесс контроля был автоматизирован за счет использования микропроцессорного устройства, содержащего программный модуль, формализующий указанный алгоритм контроля. Автоматизация процесса контроля позволила реализовать в практике реального производства результаты диссертационной работы, что обеспечило в режиме реального времени контроль качества обработки детали и технического состояния режущего инструмента и станочного оборудования.

Методы исследований: методы теории колебаний, идентификации и математической статистики. Разработка алгоритма контроля динамического поведения обрабатывающих систем и определения на этой основе их ресурса осуществлялось на основе методов информационных технологий. Анализ экспериментальных данных проводился на основе теории цифровой обработки сигналов. Для решения задач определения ресурса использованы методы случайного поиска.

**Ключевые слова:** контроль, динамическое поведение, режущий инструмент, обрабатывающие системы, техническое состояние, шероховатость, звук, вибрация, микропроцессорное устройство.

## SUMMARY

**Nagorny V.V. Control dynamic behavior of metal-processing systems and method of determining their life.** - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines. Sumy State University, Sumy, 2015.

The work is devoted to the actual problem of control dynamic behavior of metal-processing systems and method of determining their life. For the first time solved the scientific and technical problem of forecasting resource of the metal-processing systems in the course of their work turning without the use of statistical data on the working time of the metal-processing systems to replace it. This problem is solved with the help of a predictive model, in the mathematical structure, which enabled the desired metal-processing systems life. A resource is defined in the identification process model, based on the results of monitoring the trend of information parameter, accompanying the working process. In order to implement operational control of the machining developed forecasting system was automated with the help of specially developed for this purpose microprocessor-based control - prognostic system, that allows simultaneous with forecasting control the quality of machining and diagnosis the technical state of the tool and machine.

Methods: cutting theory, oscillation theory, identification and mathematical statistics. System design, was based on the methods of information technology. Experimental data, were analyzed, based on the theory of digital signal processing. To solve the problems prediction used methods of random search.

**The keywords:** forecasting, machining systems, diagnosing technical condition, roughness, sound, vibration, microprocessor-based prognostic and diagnostic system.

Підписано до друку 00.00.2015 р.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 0000.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007р.