

УДК 621.906

Н.Т. Зубовецька

### ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ КОІНТЕГРАЦІЇ

*В статті розглянуто методику і складено програму для прогнозування динамічної якості металорізальних верстатів. Методика та програма базується на основі теорії коінтеграції рядів часової динаміки. Наведено результати тестування програми.*

*Ключові слова:* газо-гідрравлічний інерційний підшипник (ГГП), динамічний процес, теорія коінтеграції, прогноз, програма  
**Форм. 6. Рис. 5. Літ. 5.**

Н.Т. Зубовецька

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОИНТЕГРАЦИИ

*В статье рассмотрена методика и составлена программа для прогнозирования динамического качества металлорежущих станков. Методика и программа базируется на основе теории коинтеграции рядов временной динамики. Приведены результаты тестирования программы.*

*Ключевые слова:* газо-гидравлический инерционный подшипник (ГГИП), динамический процесс, теория коинтеграции, прогноз, программа

N. Zubovetska

### PREDICTION OF DYNAMIC PROCESSES IN METALLOREZHUCHIH MACHINE BASED ON THE THEORY COINTEGRATION

*In article the technique is considered and the program for forecasting of dynamic quality of metal-cutting machines is made. The technique and the program is based on a basis of the theory of a kointegration, of ranks of temporary dynamics. Results of testing of the program are given in article.*

*Keywords:* gazo-hydraulic inertial bearing (GHIB), dynamic process, kointegration theory, forecast, program

**Постановка проблеми.** У Луцькому національному технічному університеті проводяться дослідження нових газо - гідравлічних інерційних підшипників (ГГП) для надвисокошвидкісних роторів [1]. Суттєвої особливістю експериментальних досліджень при цьому є неможливість візуального контролю параметрів і великі труднощі апаратного доступу для діагностики стану при роботі ГГП. Враховуючи значні витрати на роботу, яка пов'язана зі розбиранням і збиранням вузлів верстатів, а також великий ризик виходу з ладу експериментальної установки, ця проблема є характерною для більшості експериментальних робіт при дослідженні верстатів. Безрозбірна діагностика дозволяє суттєво зменшити рівні ризику і втрат при експериментальних дослідженнях, тому вирішення означеної задачі є актуальним.

**Основний зміст дослідження.** Основна ідея, яка покладена в роботу, полягає у тому щоб діагностувати скритий динамічний процес на основі паралельно протікаючого динамічного процесу, який можна спостерігати при порівняно менших витратах на проведення досліджень.

У практиці дослідження економічних процесів широко використовується теорія коінтеграції рядів часової динаміки (РЧД), сутність якої полягає у тому, що два РЧД  $u(t)$  і  $f(t)$  коінтегровані (зв'язані), якщо обидва ряди мають однаковий порядок  $p$  інтеграції  $I(p)$  [2], де – порядок взяття перших різниць від базового ряду, після якого ряд має порядок  $I(0)$ . Для оцінки  $I(p)$  використовують спеціальну статистику Дарбіна – Уотсона і тести Дики - Фуллера [2]. Одним із розповсюджених методів тестування коінтегрованості РЧД  $u(t)$  і  $f(t)$  є критерій Еангеля – Гренджера [2]. При цьому, якщо обидва РЧД  $u(t)$  і  $f(t)$  мають однаковий порядок  $I(p)$ , то  $f(t)$  можна виразити лінійною комбінацією ряду  $u(t)$  або лінійною регресією:

$$f(t) = a + b \cdot u(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

де:  $\varepsilon(t)$  - стаціонарний процес або похибка.

Якщо вихідні РЧД не коінтегровані, то необхідно провести процедури взяття перших різниць від базових рядів з метою позбавлення їх різних трендів.

Коінтеграція двох РЧД 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 для технічних систем, ніж для економічних. У технічних системах динамічну зв'язність двох РЧД не треба доводити, вона витікає з сутності процесів. Наприклад, швидкість розігріву підшипникової опори явно залежить від інтенсивності її навантаження, похибки обробки заготовки визначаються змінним припуском на її поверхні і т.д. У цьому випадку з'являється можливість прогнозування послідовності ряду  $y(t)$  по заданому  $x(t)$ , якщо коінтегрованість цих двох РЧД доведена.

В будь-якому аспекті в даному дослідженні РЧД розглядаються у складі розімкненої кібернетичної моделі управління (рис. 1), де дискретні послідовності:  $u_i$  – впливів (шоків); де  $f_i$  – відгуків (реакцій);  $\varepsilon_i$  – перешкод (шуму);  $h[x_i]$  – вагова функція.

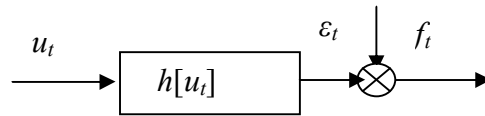


Рис. 1. Кібернетичне уявлення коінтегрованих процесів

Процес прогнозування згідно викладеному складається із наступних етапів:

1. Визначення навчальної виборки шляхом запису  $N$  пар  $[u_i, f_i]_i, i=1, 2, \dots, N$ .
2. Приведення  $[x_i, y_i]_i$  до коінтегрованості, якщо це потрібно.
3. Уведення послідовності шоків  $F_i$  для процесу  $\Phi_i$ , який прогнозується; при цьому процеси  $F_i$  і  $\Phi_i$  утворюють пару дискретних значень  $[F_i, \Phi_i]$ , яка є предметом дослідження.
4. Визначення вагової функції  $h[F_i]$  методом багатовимірної лінійної екстраполяції (БВЛЕ [3]) на основі інтегралу Дюамеля [4].
5. Визначення реакції  $\Phi_i$  за ваговою функцією  $h[F_i]$  процесу.
6. Побудова регресійної моделі залежності реакцій від шоків  $f_i = a + b \cdot F_i + \varepsilon(t)$  виду (1), або більш високих порядків.
7. Статистична оцінка моделей.
8. Побудова прогнозів на основі отриманих моделей.

Для автоматизації означеної методики була розроблена програма ConRow в середовищі

Borland Delphi-7, інтерфейс якої на розкритій вкладці «Часові ряди» представлений на рис.

2. 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.

При генерації рядів об'єкт моделювався аперіодичною динамічною ланкою, передатна функція якої:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (3)$$

де:  $K$  – коефіцієнт підсилювання;  $T$  – постійна часу, яка характеризує лаг (затримку);  $s$  – комплексна змінна Лапласа.

Для імітації поведінки об'єкту необхідно задати функцію відгук на вхідний вплив. Для конкретного об'єкту ця функція може виражати, наприклад, залежність зміни температури опори  $T^0(t)$  від зміни частоти обертання ротора  $n(t)$ .

Параметри об'єкту  $K, T$ , вводяться в блоці «Параметри об'єкту тестування», параметри шуму – в блоці «Ст. відхил. шуму».

Процедури за допомогою яких здійснюється генерація заданого сигналу  $u(t)$  і обчислюють відгук  $f(t)$ . При цьому у процедурах передбачена генерація трьох видів:

- 1) лінійний  $u(t) = A + Bt \cdot S(t)$ ;
- 2) показовий  $u(t) = A + Bt^c + S(t)$ ;
- 3) експоненціальний  $u(t) = A + B[1 - \exp(-t/c)] + S(t)$ .

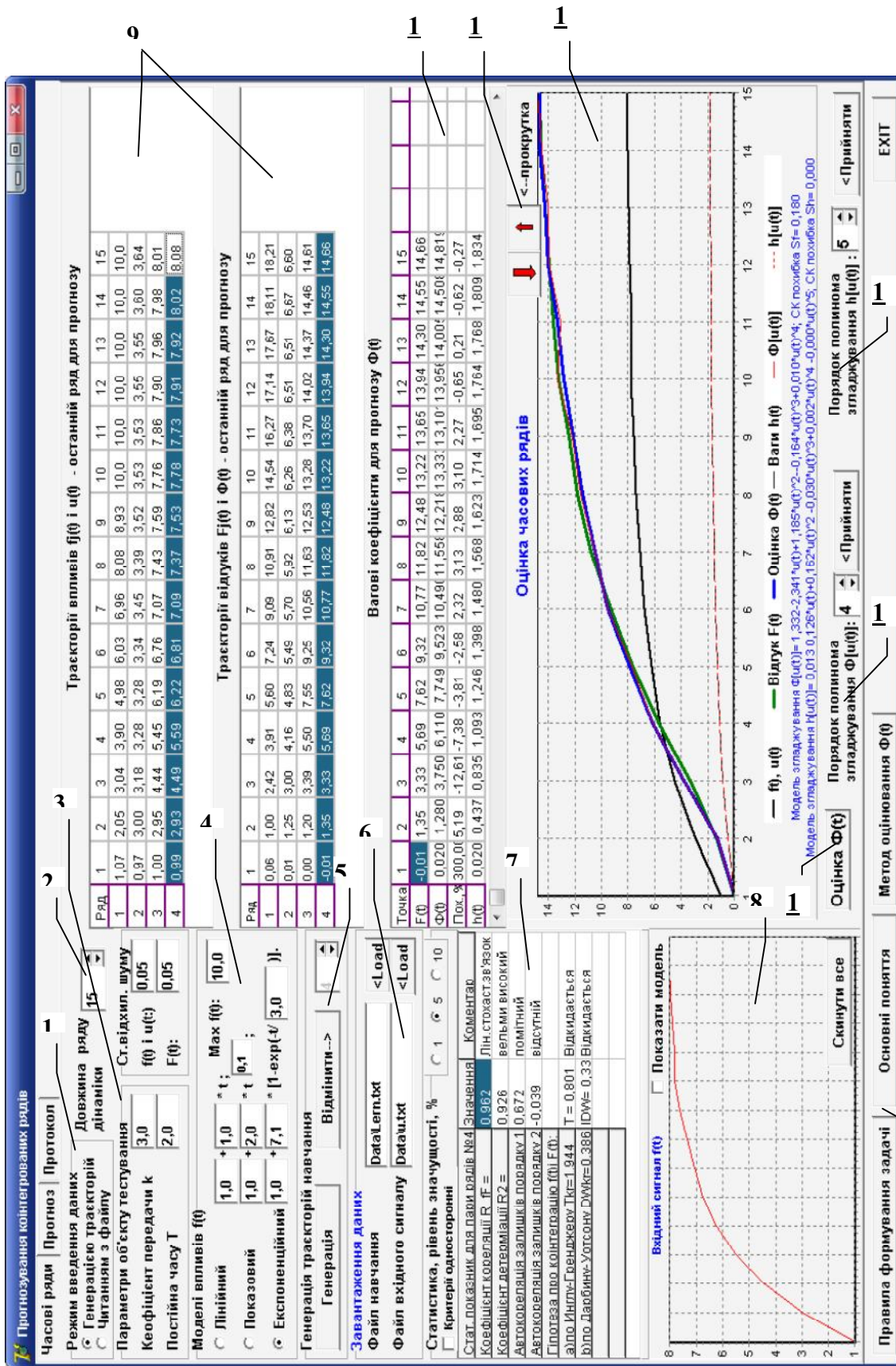


Рис. 2. Інтерфейс (головна форма) програми ConRow

Форма цих вхідних сигналів демонструється на графіку поз. 8. В тому самому вікні може бути показана схема генерації за допомогою пакету моделювання MBTU (рис. 3).

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

Статистика за результатами аналізу рядів відображається у таблиці (поз. 7). Тут задається рівень значимості статистик у % (за умовчанням - 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) [2];
- 4) автокореляція для залишків, модель AR(2);
- 5) підтвердження (або ні) гіпотези про коінтеграцію пари рядів за статистикою Енгла – Гренджера [2];
- 6) підтвердження (або ні) гіпотези про коінтеграцію пари рядів за статистикою Дарбіна – Уотсона [2].

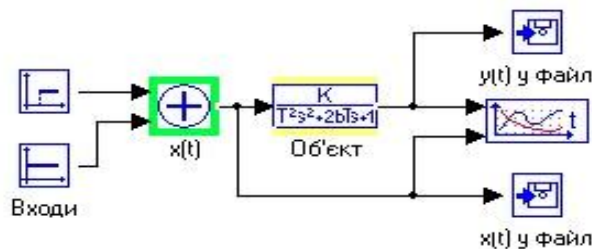


Рис. 3. Схема генерації за допомогою пакету моделювання MBTU

Введені, або генеровані дані відображаються в двох відповідних таблицях (поз. 9): «Траєкторії впливів ...»  $f(t)$  і «Траєкторії відгуків ...»  $F(t)$ . Останні строки цих таблиць містять дані для прогнозованого ряду, який оцінюється. В третій таблиці (поз. 11) відображаються результати передбачення (прогнозу). Таблиця має 4 строки, в яких надаються для кожної точки залежного ряду  $F(t)$  наступні дані:

- 1)  $F(t)$  – введені дані, якщо вони відомі;
- 2)  $\Phi(t)$  – прогнозовані дані за методом 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  $\Phi(t) = u(t) \cdot h(t)$ .

Прогнозований за методом БВЛЕ ряд  $\Phi(t)$ ,  $\Delta(t)$  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  $\Phi$  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 авто регресії для одного ряду AR(p) [2], де  $p$  - порядок (лаг) моделі. Моделі CR(p) для  $\Phi[u(t)]$  і  $h[u(t)]$  будуються за формулами:

$$\begin{aligned} CR(p)_{\Phi[u(t)]} : \Phi_t &= a_0 + a_1 u_{t-1} + a_2 u_{t-2} + \dots + a_p u_{t-p} + \varepsilon_{\Phi t}; \\ CR(p)_{h[u(t)]} : h_t &= b_0 + b_1 u_{t-1} + b_2 u_{t-2} + \dots + b_p u_{t-p} + \varepsilon_{ht}, \end{aligned} \tag{4}$$

де:  $\varepsilon_{\Phi t}$  і  $\varepsilon_{ht}$  - процеси, які пов'язані з залишками.

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

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

Програма **ConRow** тестувалася на імітаційному експерименті навантаженням динамічної ланки (3). Точне рішення при вхідному динамічному впливі  $u(\tau)$  маємо у вигляді інтегралу згортки

$$y(t) = \int_0^t \frac{k}{T_u} e^{-(t-\tau)/T_u} [u(\tau) + S(\tau)] d\tau + V(t), \quad (5)$$

де:  $S(\tau)$  і  $V(\tau)$  імітація нормально розподіленого шуму, який накладався відповідно на вхідний сигнал  $u(\tau) = u(\tau) + S(\tau)$  і відгук  $Y(t) = Y(t) + V(t)$  з параметрами розподілу  $N_u(0, S_u)$  і  $N_y(0, S_y)$ .

В машинному експерименті стандартне відхилення шуму приймалося рівним:  $S(\tau) = 0,2$  і  $V(\tau) = 0,2$ .

Результати машинного експерименту при різних формах впливу вхідних впливах  $u(\tau)$  на об'єкт наведені на рис. 4.

Параметри об'єкту, що імітувався наступні:  $k=3,0$  - коефіцієнт передачі (підсилення);  $T_u=3,0$  - постійна часу, яка імітує затримку. Довжина дискретного динамічного ряду  $n = 28$  точок спостереження. Вхідний сигнал (вплив) імітувався функціями: лінійною  $u(t) = A + Bt \cdot S(t)$ ; показовою  $u(t) = A + Bt^c + S(t)$ ; експоненціальною  $u(t) = A + B[1 - \exp(-t/c)] + S(t)$ .

Коефіцієнти  $A, B, c$  задавалися довільно. На рис. 5 і 6 надані результати машинного експерименту. У формулах на рисунках  $1(t)$  - одинична ступінчаста функція [5].

Контрольний вхідний сигнал приймався експоненціальним (рис. 5). По цьому сигналу  $u(t)$  і контрольному відгуку  $F(t)$  робився прогноз траєкторії  $\Phi(t)$ .

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:

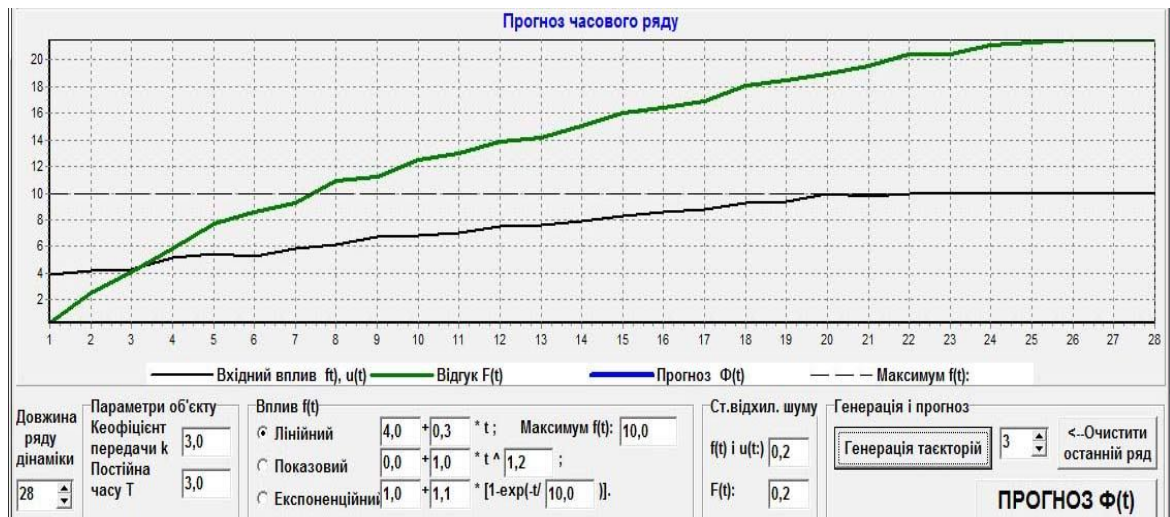
$$\delta = \frac{F(t) - \Phi(t)}{F(t)} \cdot 100\%. \quad (6)$$

З аналізу бачимо, що при досить різноманітних вхідних сигналах, як у навчальній вибірці, так і у прогнозованому процесі помилки прогнозування за винятком початкових точок (2 .. 6) знаходяться у межах 2 – 10 %, при цьому кінцева траєкторія не виходить за межі 3 – х відсоткової помилки.

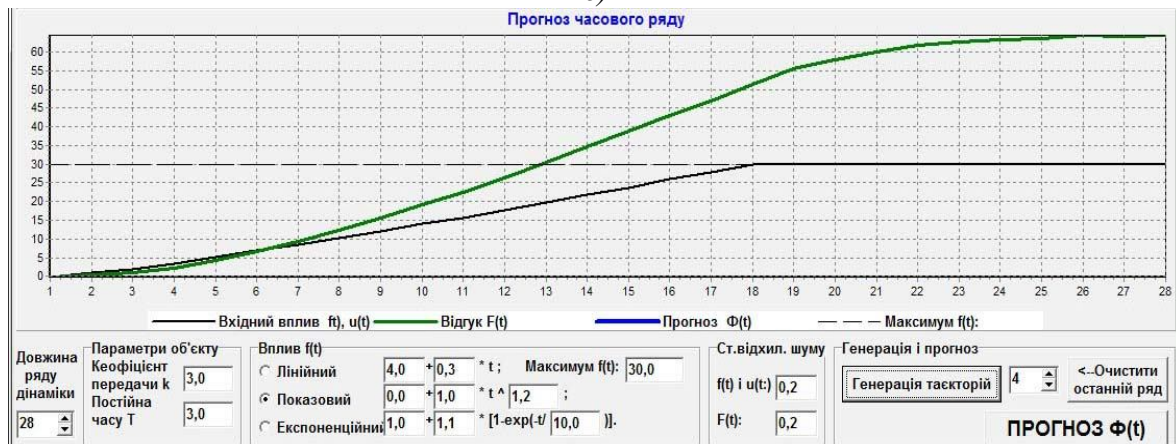
Таким чином, можна констатувати, що розроблена методика прогнозування часових динамічних рядів забезпечує достовірний прогноз і може використовуватися при експериментальних дослідженнях зв'язаних часових рядів динаміки верстатів.



a)



б)



в)

Рис. 4. Результати машинного експерименту при вхідних впливах на об'єкт:

а) ступінчастому  $f(t) = [20,0 + S(t)] \cdot 1(t)$ ; б) лінійному  $f(t) = [4,0 + 0,3 \cdot t + S(t)] \cdot 1(t)$ ;

в) показовому  $f(t) = [1,0 \cdot t^{1,2} + S(t)] \cdot 1(t)$

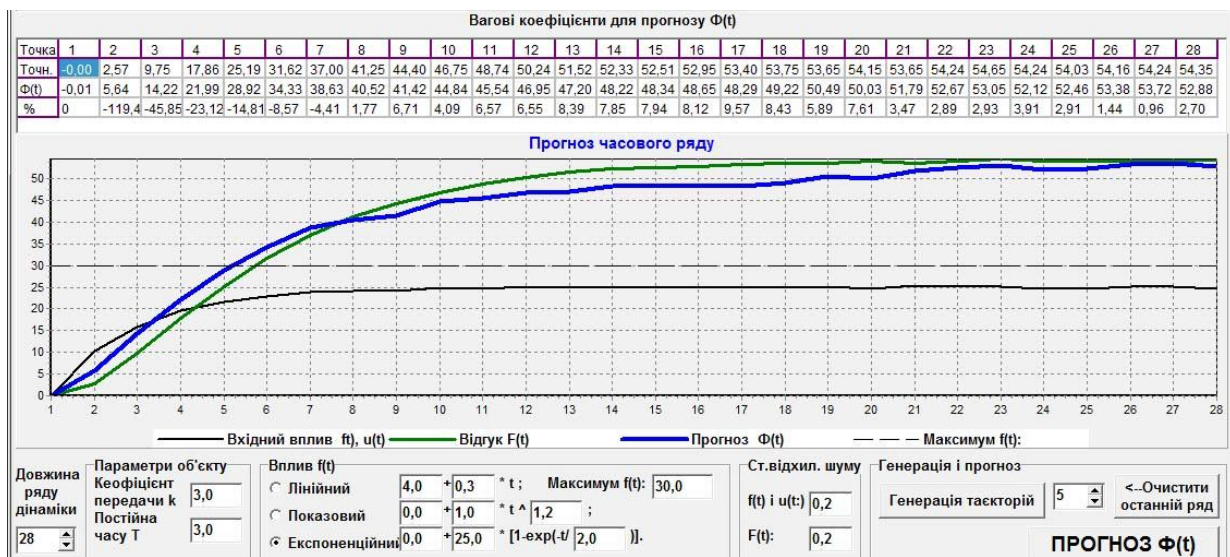


Рис. 5. Результати машинного експерименту з контрольним вхідним експоненціальним

$$\text{сигналом } u(t) = \{25,0 \cdot [1 - e^{-t/20}] + S(t)\} \cdot 1(t)$$

**Висновки.** Дослідження показали, що методика, яка пропонується, і програма, складена на її основі, дозволяють достатньо достовірно і оперативно прогнозувати РЧД, які характерні для динаміки верстатів. Тестування показало високу надійність і достовірність розробленої методики і програми. Методика і програма можуть використовуватися при експериментальних дослідженнях і прогнозуванні динамічної якості металорізальних верстатів.

1. *Зубовецька Н.Т.* Навантажувальна здатність і енергетичні характеристики високошвидкісних радіальних газо-гидравлічних інерційних підшипників: дисертація кандидата технічних наук: 26.05.10 / Зубовецька Наталія Тарасівна. – Луцьк., – 190 с.
2. *Суслов В. И.* Эконометрия / В.И. Суслов, Н.М. Ибрагимов, Л.П. Талышева, А.А. Цыплаков // Новосибирск.: СО РАН. – 2005. – 744 с.
3. *Ксенофонтов М.Ю.* Теоретические и прикладные аспекты прогнозирования / М.Ю. Ксенофонтов // М.: Издательство ИСЭПН. – 2002. – 402 с.
4. *Саперштейн Н.Г.* Процессы автоматического управления и обобщенное дифференцирование / Н.Г.Саперштейн // М.: Высшая школа. – 1973. – 240 с.
5. *Захаров П.О.* Структурно-параметрична ідентифікація динамічного економічного процесу П.О. Захаров, І.П. Милько // Актуальні проблеми економіки. – 2009. - № 6(96). – С. 271-279.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2013.