

М. С. Юхимчук, к. т. н., доц.

## ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ РОЗПОДІЛЕНИХ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Важливою складовою розв'язання проблеми децентралізованої координації керування розподіленими кібер-фізичними системами (РКФС) є отримання первинної інформації, яка необхідна для пошуку оптимального керування. Таку інформацію можна розділити на умовно постійну – параметри об'єкта керування, і змінну – стан об'єкта керування. Визначення параметрів об'єкта здійснюється шляхом розв'язання задачі ідентифікації. Інерційність об'єкта і, відповідно, можливість зміни стану його елементів протягом циклу координації обумовлює необхідність прогнозування процесів в РКФС. В більшості робіт з проблеми прогнозування розглядаються методи, в яких так чи інакше використовуються експертні оцінки і висновки. Це стосується переважно соціально-економічних процесів, прогнозів у медицині, освіті тощо.

В цій роботі розглядаються прогнози для кібер-фізичних систем, і хоча тут значно більшу роль відіграють моделі фізичних процесів і формальні методи прогнозування, проте на певних етапах також використовуються експертні оцінки, зокрема щодо діапазонів можливої зміни параметрів, переліку впливових факторів тощо. В роботі удосконалено метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з неперервними об'єктами на основі просторово-часового спектрального підходу до прогнозування стану РКФС з неперервними та дискретними станами об'єктів, проведено дослідження характеристик прогнозування стану РКФС. Розглянута можливість реалізації методу прогнозування з використанням машинного навчання та імітаційного моделювання. Визначена доцільність глибини прогнозування із збільшенням глибини (інтервалу) прогнозу невизначеність результатів прогнозування зростає. В той же час на здійснення прогнозування витрачається час і обчислювальні ресурси. Поступово настає ситуація, коли позитивний ефект від прогнозування стає меншим за витрати на його здійснення, що і визначає доцільну максимальну глибину прогнозування.

**Ключові слова:** прогнозування, розподілені системи, координація.

### Вступ

Проблема прогнозування різноманітних процесів має давню історію і безліч методів і прикладів розв'язання різноманітних задач. Більшість з них присвячені задачам нетехнічного характеру, в основному соціально-економічного і політичного.

В роботі [1] наведено класифікацію і характеристики задач прогнозування, показані в табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація об'єктів прогнозування

Природа	Масштабність	Складність	Детермінованість	Тренд	Інформаційна забезпеченість
Технічна	Сублокальний	Надпростий	Детермінований	Дискретний	Повна кількісна
Техніко-економічна	Локальний	Простий	Стохастичний	Аперіодичний	Неповна кількісна
Соціально-економічна	Субглобальний	Складний	Змішаний	Циклічний	Якісна
Военно-політична	Глобальний	Надскладний	Нечіткий	Складний, наблизений до спірального	Відсутність інформації
Природна	Суперглобальний	Складний	Стохастичний	Циклічний	Неповна кількісна

Ця класифікація відображає дещо спрощений погляд на технічне прогнозування. Зокрема, з точки зору масштабності не враховуються завдання прогнозування процесів в розподілених технічних системах різних масштабів, аж до таких глобальних, як Інтернет.

Розглядаючи об'єкти прогнозування з точки зору складності, візьмемо до уваги визначення складної системи по Л. А. Растрігіну [2]: складною є система, в якій спостерігаються синергетичні ефекти, тобто система, яка складається з множини взаємодіючих складових (підсистем), внаслідок чого система набуває нових властивостей, які відсутні на підсистемному рівні. Існує безліч подібних технічних систем, зокрема, нейронні мережі.

Детермінованість процесів також не є характерною особливістю технічних систем. Наявність різноманітних випадкових збурюючих впливів на систему, а також недетермінована поведінка людей, що взаємодіють з технічними засобами автоматизованих систем, призводять до недетермінованих, а іноді і хаотичних процесів. У свою чергу недетермінованість в поєднанні з нелінійністю багатьох технічних об'єктів призводить до синергетичних ефектів і складних трендів.

Інформаційна забезпеченість вкрай рідко наближається до повної. В найбільшій мірі це стосується розподілених динамічних систем, повний контроль стану яких вимагає величезних витрат, а часто і технічно неможливий.

Ще на початку минулого століття видатний економіст А. Базаров-Руднев [3] назвав три методи прогнозування: екстраполяція, аналітична модель, експертиза. Сьогодні в сфері керування технічними системами використовується більше 200 модифікацій і комбінацій цих методів прогнозування в різних сферах діяльності.

Коректний підхід до прогнозування включає кілька етапів:

- ретельне вивчення природи досліджуваного об'єкта або процесу для вибору адекватного методу прогнозування;
- виділення двох груп серед доступних даних – для розроблення прогнозів і для перевірки отриманих результатів;
- уточнення вихідних даних з метою виявлення помилок;
- розроблення прогнозів і оцінювання достовірності отриманих результатів;
- використання (інтерпретація) отриманих результатів і виконання, при необхідності, уточнення і доповнення прогнозів.

Численні прийоми прогнозування засновані або на використанні експертних оцінок, або на моделюванні, або на сполученні цих методів [4, 5, 6].

В більшості робіт з проблеми прогнозування розглядаються методи, в яких так чи інакше використовуються експертні оцінки і висновки. Це стосується переважно соціально-економічних процесів, прогнозів у медицині, освіті тощо.

### **Постановка задачі**

Окремим видом задач прогнозування, які потребують додаткових досліджень є прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з неперервними технологічними об'єктами. У таких системах спостерігається декілька типів зв'язку між компонентами РКФС, який впливає на результат прогнозування: фізична взаємодія окремих зон неперервного розподіленого технологічного об'єкта (РТО), енергетична та інформаційна взаємодія між локальними системами керування (ЛСУ) і керованими елементами у зонах РТО, інформаційна взаємодія між координаторами ЛСУ [7].

Методика прогнозування стану розподіленого об'єкта і алгоритм проактивної координації залежить від просторово-часових характеристик впливів на об'єкт. З огляду на просторовий розподіл впливу виділимо три основних типи:

- Точковий вплив;
- Зональний вплив;
- Просторово-неперервний вплив.

Більшість об'єктів піддаються одночасно декільком впливам з різними просторовими розподілами. Ці впливи змінюють динамічні процеси у розподіленому об'єкті. Узагальнена структура проактивного координаційного керування розподіленим кібер-фізичним об'єктом зображена на рис. 1. Локальна система керування (ЛСУ) керує станом  $v$  елемента розподіленого об'єкта шляхом забезпечення його потоком ресурсу  $p_0$ . Завдання  $v_0$  надходить від координатора, який шукає оптимальне керування відповідно до заданого критерію. Предиктор прогнозує зміну стану елемента при певному керуванні, тобто система координатор-предиктор працюють як еталонна модель системи.

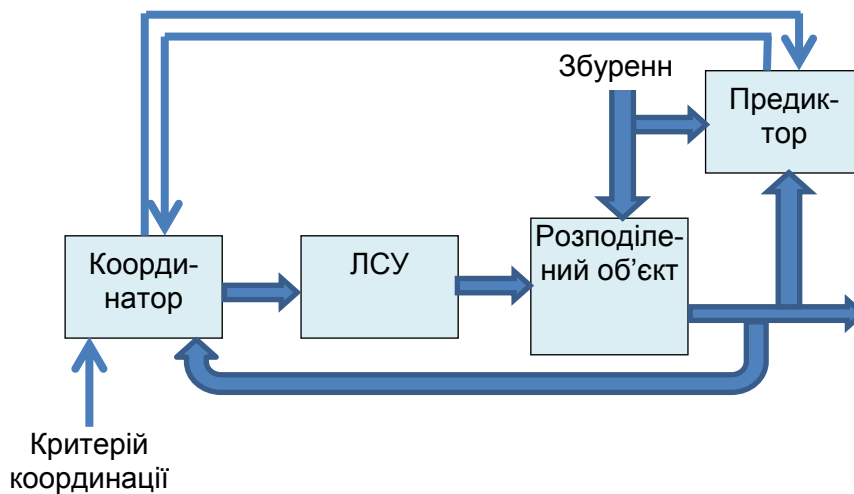


Рис. 1. Схема координації з предиктором

Проте на стан елемента об'єкта впливає не тільки ЛСУ, а ще й сусідні елементи, зовнішнє середовище, а також витрати ресурсу, накопиченого у керованій зоні об'єкта, на виробництво, які залежать від обсягу виробництва, який визначається кількістю сировини  $x$  і станом  $v$ .

Отже, динамічні процеси у розподіленому об'єкті з ресурсним керуванням розглядаються як взаємодія трьох полів:

- Поле параметрів об'єкта  $\mathbf{V}(\mathbf{Z}, t)$ , де  $\mathbf{V} = \{v_i\}$  – вектор станів;  $v_i$  – стан  $i$ -го елемента об'єкта;  $\mathbf{Z}_i = \{z_{ik}\}$  – вектор координат  $i$ -го елемента об'єкта;
- Поле керуючих впливів  $\mathbf{p}_0(\mathbf{Z}, t)$ ;
- Поле збурень  $\mathbf{u}(\mathbf{Z}, t)$ ;
- Потік сировини  $\mathbf{X}(\mathbf{Z}, t)$ .

**Метою роботи** є розроблення підходу до прогнозування змін поля станів під дією поля збурень і потоку сировини. При цьому джерело ресурсу ЛСУ вважається необмеженим.

### Отримані результати

У [8] розроблено модель елемента розподіленого неперервного об'єкта. На рис. 2 показані впливи на елемент об'єкта.

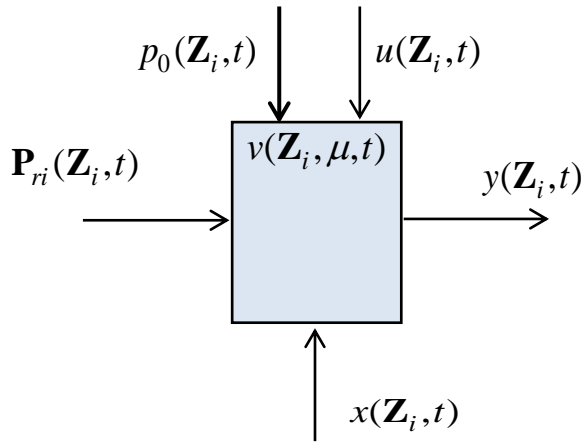


Рис. 2. Елемент об'єкта кібер-фізичної системи

В [8] наведені моделі залежності витрат ресурсу на виробництво продукції від стану елемента (обернена виробнича функція елемента) і система рівнянь стану елемента у диференціальній формі

$$\begin{cases} dv_i = \left( K \left( p_{0i} + \sum_{j=1}^{n_\varepsilon} p_{ji} \right) - \Delta v_i \right) dt, \\ \mathbf{P}_{ri}(\mathbf{Z}_i, t) = \sum_{j=1}^{n_\varepsilon} p_{ji} \\ y_i = w(v_i, \Delta v_i) \\ \Delta v_i = \frac{\mu(v_i) x_i}{\eta} \end{cases} \quad (1)$$

де  $\mu$  – питомі витрати ресурсу на одиницю сировини  $x$ ;  $\mathbf{P}_r = \{p_{ji}\}$  – матриця потоків ресурсів між елементами РТО;  $K$  – коефіцієнт ресурсоемності (характеризує величину зміни стану об'єкта на одиницю ресурсу, що надійшов);  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії (к. к. д.);  $n_\varepsilon$  – кількість елементів РТО в  $\varepsilon$ -області  $i$ -го елемента, вплив яких на його стан є суттєвим [8].

Розглянемо найпростіший випадок  $\mu(v) = const$ . Тоді з (1), інтегруючи по поверхні  $\varepsilon$ -області з центром в  $\mathbf{Z}_i$ , отримаємо

$$v(\mathbf{Z}_i, t) = v(\mathbf{Z}_i, 0) + \eta \int_0^t \left[ p_0(\mathbf{Z}_i, t) + u(\mathbf{Z}_i, t) + \iint_{S/\varepsilon(\mathbf{Z}_i)} \{ \mathbf{P}_r(\mathbf{Z}_i, t) \times \mathbf{1} \} d[s(\mathbf{Z})] - \mu x \right] dt \quad (2)$$

Інтеграл по поверхні дає усереднене значення потоку обміну ресурсом між елементом, який розглядається, і іншими елементами розподіленого об'єкта.

Для нескінченно малого елемента неперервного об'єкта можна записати

$$v(\mathbf{Z}_i, t) = v(\mathbf{Z}_i, 0) + \eta \int_0^t \left[ p_0(\mathbf{Z}_i, t) + u(\mathbf{Z}_i, t) + \operatorname{div}[\mathbf{p}_r(\mathbf{Z}_i, t)] - \mu x \right] dt$$

Величина потоку ресурсу між двома елементами з координатами  $(\mathbf{Z}_i, \mathbf{Z}_j)$  [8]

$$p_j(\mathbf{Z}_i, \mathbf{Z}_j, \tau_{0j}) = \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) [v(\mathbf{Z}_i) - v(\mathbf{Z}_j)]. \quad (3)$$

$$\gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) = \frac{1}{8(\pi\lambda\tau_{0j})^{3/2}} e^{-\frac{|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j|^2}{4\lambda\tau_{0j}}}$$

де

Тоді у кожній точці розподіленого об'єкта потік перетікання

$$\operatorname{div} p_r(\mathbf{Z}_i) = \iint_{S/\varepsilon(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) [v(\mathbf{Z}_i) - v(\mathbf{Z}_j)] dz_1 dz_2. \quad (4)$$

Оскільки прогнозування здійснюється на основі даних, що надходять від дискретних сенсорів, зручнішою є дискретна форма рівняння (4). В лінійних об'єктах потоки адитивні, отже

$$P_r(\mathbf{Z}_i) = \sum_{j: \mathbf{Z}_j \in \varepsilon(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) [v(\mathbf{Z}_i) - v(\mathbf{Z}_j)]. \quad (5)$$

Еквівалентна структурна схема елемента показана на рис. 3.

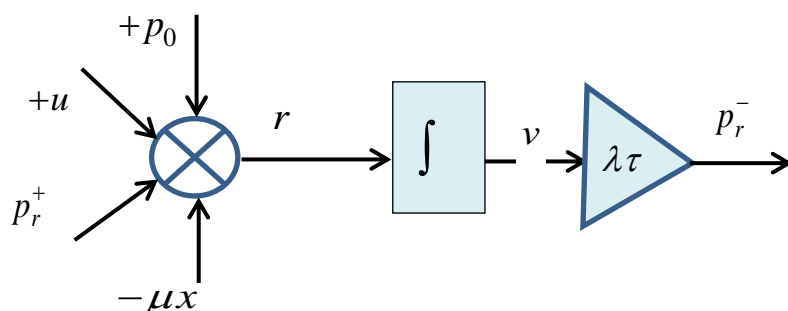


Рис. 3. Еквівалентна структурна схема елемента

Прогнозування стану елементів РТО здійснюється в умовах невизначеності. Невизначеність стану елемента зумовлена такими факторами:

- Невизначеність впливу зовнішнього середовища;
- Невизначеність стану оточуючих елементів, які впливають на елемент, що розглядається;

- Невизначеність параметрів середовища розповсюдження впливу;

- Невизначеність векторів виробничої програми  $\mathbf{X}$  і питомих витрат  $\mathbf{M}$

Вплив зовнішнього середовища і оточуючих елементів здійснюється через потік ресурсу. Оцінимо дисперсію стану елемента об'єкта.

$$\sigma_v^2(\mathbf{Z}_i, t) = \sigma_{v(\mathbf{Z}_i, 0)}^2 + \int_0^\infty \int_0^\infty G_{rr}(\omega, \Psi) e^{i\Psi \mathbf{Z}_i} d\Psi d\omega, \quad (6)$$

де  $G_{rr}$  – автоспектральна щільність ресурсу, що надходить/витрачається елементом.

Враховуючи, що у лінійних об'єктах спектральні щільності потужності адитивні з

урахуванням взаємної кореляції, запишемо баланс спектральних щільностей ресурсу елемента

$$\left\{ \begin{aligned} G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) &= G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) \cdot W_{v_0p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega, \Psi) &= G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) + G_{uu}(\omega, \Psi) + G_{xx}(\omega, \Psi) + \sum_{r \in \mathcal{E}} G_{p_r p_r} + \\ &+ 2G_{p_0u}(\omega, \Psi) + 2G_{p_0x}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{r \in \mathcal{E}} G_{p_0 p_r}(\omega, \Psi) - \\ &- 2G_{ux}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{r \in \mathcal{E}} G_{up_r}(\omega, \Psi) - 2 \sum_{r \in \mathcal{E}} G_{p_r x}(\omega, \Psi) \\ G_{vv}(\omega, \Psi) &= G_{rr}(\omega, \Psi) \cdot \left( \frac{1}{T\omega} \right)^2 \\ G_{p_r p_r}(\omega, \Psi) &= \int_0^\infty \left\{ \iiint_{\Omega} [R_{p_r p_r}(\tau, \mathbf{Z}) e^{-j\mathbf{\Psi}\mathbf{Z}}] e^{-j\omega\tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{aligned} \right. \quad (7)$$

де  $\omega$  – часова кругова частота;  $\Psi$  – вектор просторових кругових частот;  $G_{rr}$  – автоспектральна щільність потужності загального вхідного ресурсу;  $G_{p_0p_0}$  – автоспектральна щільність потужності керівного впливу (зовнішнього ресурсу);  $G_{uu}$  – автоспектральна щільність потужності збурень;  $G_{vv}$  – автоспектральна щільність потужності стану (накопичений ресурс);  $G_{xx}$  – автоспектральна щільність потужності використання та/або розсіювання ресурсу;  $G_{p_0p_0}$  – автоспектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження;  $G_{ux}$  – взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини.

Вплив зовнішнього середовища і витрати сировини на виробництво можна вважати незалежними, отже  $G_{ux} = 0$ .

Взаємна спектральна щільність потужності керівного впливу і вхідного ресурсу, який надходить від сусідніх елементів  $G_{p_0p_r}$  визначається алгоритмом і параметрами координатора і ЛСУ. У найпростішому випадку координатор розраховує вплив за:

$$v_0 = \left( \mu x - \sum_{r \in \mathcal{E}(Z_i)} p_r - ku \right) \cdot |W_{v_0p_0}^{-1}|, \quad (8)$$

де  $p_r = p_r^+ - p_r^-$ ; у дужках – баланс потоків ресурсу на вході елемента;  $W_{v_0p_0}$  – передатна функція регулятора стану елемента ( $v_0$  – його вхід,  $p_0$  – вихід), да  $k = \frac{W_0 W_{ЛСУ}}{1 + W_0 W_{ЛСУ}}$  –

коефіцієнт ослаблення впливу зовнішнього середовища впливом ЛСУ, після чого розв’язує задачу оптимізації. Причому координатор розраховує  $p_r$  на основі (5). Наявність в алгоритмі розрахунку великої кількості факторів, що впливають на результат, приводить до зменшення взаємної парної кореляції, отже можемо вважати  $G_{v_0p_r} \approx 0$ . Аналогічно  $G_{p_r x} \approx 0$  і  $G_{up_r} \approx 0$ .

Оскільки оптимальне значення вхідного ресурсу задається координатором, який враховує вплив зовнішнього середовища і ЛСУ, для знаходження  $G_{v_0\mu}$  домножимо (8) на  $v_0$ , усереднюємо і перетворюємо за Фур'є. Отримуємо:

$$G_{v_0v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \left[ \mu G_{v_0x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - k G_{v_0\mu}(\omega, \mathbf{Z}_i) \right] \cdot W_{v_0p_0}^{-1}(\omega), \quad (9)$$

звідки

$$G_{v_0\mu}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \frac{\mu}{k} G_{v_0x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - \frac{W_{v_0p_0}(\omega)}{k} G_{v_0v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i). \quad (10)$$

Для визначення  $G_{p_0x}$  будемо виходити з гіпотези, що чим більший збурюючий вплив сусідніх елементів і оточуючого середовища, тим більше відхиляється значення  $p_0$  від номінального  $v_0$ . Очевидно, при  $\forall v(\mathbf{Z}) = v_0 = u$  потоки перетікання ресурсу будуть відсутні. Для отримання часової залежності  $R_{p_0x}(\tau, \mathbf{Z}_i)$  розглянемо структурну схему локальної координації (рис. 4).

Стан сусідніх елементів

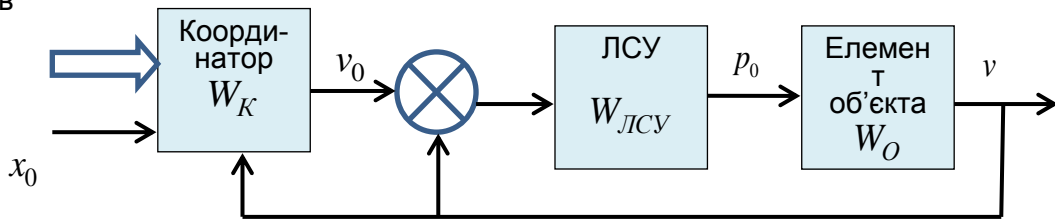


Рис. 4. Схема локальної координації

Передатна функція  $x_0 \xrightarrow{W} v_0$

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) = \frac{W_K}{1 + W_K \frac{W_{ЛСУ} W_0}{1 + W_{ЛСУ} W_0}} = \frac{W_K (1 + W_{ЛСУ} W_0)}{1 + W_{ЛСУ} W_0 + W_K W_{ЛСУ} W_0}$$

Вважатимемо координатор і ЛСУ аперіодичними елементами з сталими часу відповідно  $T_K$  і  $T_{ЛСУ}$ . Отримуємо

$$\begin{aligned} W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) &= \frac{\frac{1}{1 + T_K p} \left( 1 + \frac{1}{1 + T_{ЛСУ} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} \right)}{1 + \frac{1}{1 + T_{ЛСУ} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} + \frac{1}{1 + T_K p} \cdot \frac{1}{1 + T_{ЛСУ} p} \cdot \frac{1}{T_0 p}} = \\ &= \frac{T_{ЛСУ} p T_0 p + T_0 p + 1}{(1 + T_K p)(1 + T_{ЛСУ} p) T_0 p + (1 + T_K p) + 1}, \end{aligned}$$

звідки частотна передатна функція

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(j\omega) = \frac{1 - T_{ЛСУ} T_0 \omega^2 + T_0 j\omega}{(1 + T_K j\omega)(1 + T_{ЛСУ} j\omega) T_0 j\omega + (1 + T_K j\omega) + 1}. \quad (11)$$

Тоді спектральні щільності потужності пов'язані співвідношенням

$$G_{p_0x}(\omega, Z_0) = G_{xx}(\omega, Z_0) \cdot W_{x_0 \rightarrow p_0}(j\omega) = G_{xx}(\omega, Z_0) \cdot \frac{1 - T_{ЛСУ}T_0\omega^2 + T_0j\omega}{(1 + T_Kj\omega)(1 + T_{ЛСУ}j\omega)T_0j\omega + (1 + T_Kj\omega) + 1} \quad (12)$$

Просторова складова спектральних щільностей визначається геометричними характеристиками розподіленого об'єкта і розташуванням точок прикладення керуючого впливу. Вплив зовнішнього збурення можна вважати білим шумом у часі, амплітуда якого максимальна на границях об'єкта і експоненціально спадає при відділенні від границь.

Результати моделювання процесу координації, наведені на рис. 5, показують, що просторовий розподіл ресурсу є сумою експоненціально спадних функцій з модами в точках прикладання впливу. Тобто:

$$G_{uu}(\omega, \Psi) = G_{uu}(\omega, \Psi \notin S) \cdot e^{-\frac{1}{4\lambda\tau} \left[ \min(\Psi_{\Omega} - \Psi) \right]} = g_u e^{-\frac{1}{4\lambda\tau} \left[ \min(\Psi_{\Omega} - \Psi) \right]}, \quad (13)$$

де  $\Omega$  – границя розподіленого об'єкта (області  $S$ );  $g_u$  – амплітуда зовнішнього шуму;

$$G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) = \sum_i G_{v_0v_0}(\omega, \Psi_{0i}) \cdot e^{-\frac{1}{4\lambda\tau}(\Psi_{0i} - \Psi)}, \quad (14)$$

де  $\Psi_{0i}$  – вектор координат  $i$ -ої точки прикладання керівного впливу.

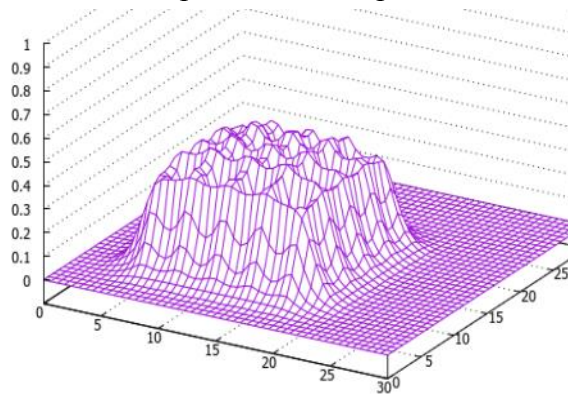


Рис. 5. Результат моделювання процесу координації РКФС

У стаціонарному режимі використання розподіленого об'єкта виробниче завдання не змінюється у часі, отже  $G_{xx}(\omega, \Psi) = G_{xx}(\omega = 0, \Psi)$ .

Знайдемо просторово-часову кореляційну функцію стану. На основі теореми Вінера-Хінчина запишемо:

$$K_{vv}(\tau, \mathbf{Z}) = 2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} G_{vv}(\omega, \Psi) \cdot e^{i\omega\tau} \cdot e^{i\Psi\mathbf{Z}} d\omega d\Psi. \quad (15)$$

Аналогічно перетворюються на кореляційні функції інші спектральні щільності потужності моделі (7).

Схему регресійного прогнозування можна зобразити у вигляді дерева на рис.6. Враховуючи лінійність залежності стану елементів від впливових факторів у моделі (1), а також кореляційну залежність між кількістю сировини  $x$  і керуючим впливом  $p_0$  (12),



запишемо прогнозоване значення стану  $i$ -го елемента через проміжок часу  $\tau$  у вигляді рівняння багатofакторної регресії від незалежних факторів

$$\begin{aligned}
 v(\tau, \mathbf{Z}_i) = & v(0, \mathbf{Z}_i) + K_{vu}(\tau, \mathbf{Z}_i) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_i)}{K_{uu}(0, \mathbf{Z}_i)}} [u(0, \mathbf{Z}_i) - m_u(\mathbf{Z}_i)] + \\
 & + K_{vx}(\tau, \mathbf{Z}_i) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_i)}{K_{xx}(0, \mathbf{Z}_i)}} [x(0, \mathbf{Z}_i) - m_x(\mathbf{Z}_i)] + \\
 & + \sum_{j \in \mathcal{E}(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) K_{vu}(\tau + \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_j)}{K_{uu}(0, \mathbf{Z}_j)}} [u(\tau - \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) - m_u(\mathbf{Z}_j)] + \\
 & + \sum_{j \in \mathcal{E}(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) K_{vx}(\tau + \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_j)}{K_{xx}(0, \mathbf{Z}_j)}} [x(\tau - \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) - m_x(\mathbf{Z}_j)]
 \end{aligned}$$

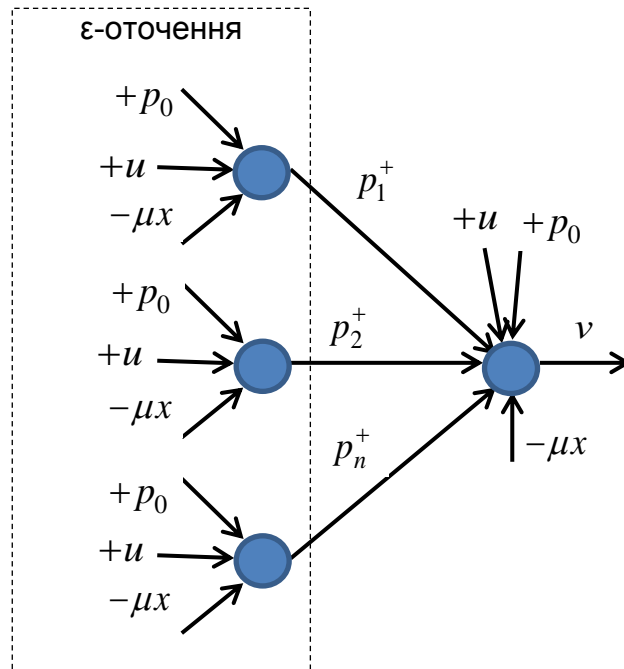


Рис. 6. Структурно-логічна схема прогнозування стану елемента РКФС

Прогнозування стану РКФС запропонованим просторово-часовим спектральним способом досліджувалося на моделі у середовищі Scilab. Моделювалася РКФС з чотирма лінійно розташованими керованими елементами. Прогноз здійснювався для елемента  $i = 2$ , у оточенні якого елементи  $i = 1$  і  $i = 3$ . Також є віддалений елемент  $i = 4$ . Зовнішній вплив  $u(t)$  – спільний для усіх елементів. Графіки процесів моделі показані на рис. 7: 1 – зміна стану зовнішнього середовища  $u(t)$ ; 2 – зміна входу сировини, на перероблення якої витрачається ресурс, для елемента  $i = 1$ ; 3 – зміна входу сировини для елемента  $i = 3$ ; 4 – зміна входу сировини для елемента  $i = 4$ ; 5 – зміна входу сировини для елемента  $i = 2$ ; 6 – стан елемента  $i = 2$ ; 7 – прогноз стану елемента  $i = 2$ ; 8 – похибка прогнозу.

Моделювання показало, що для РКФС зазначеної структури RMSE=14 %, що прийнятно для використання результатів прогнозування для цілей координаційного керування.

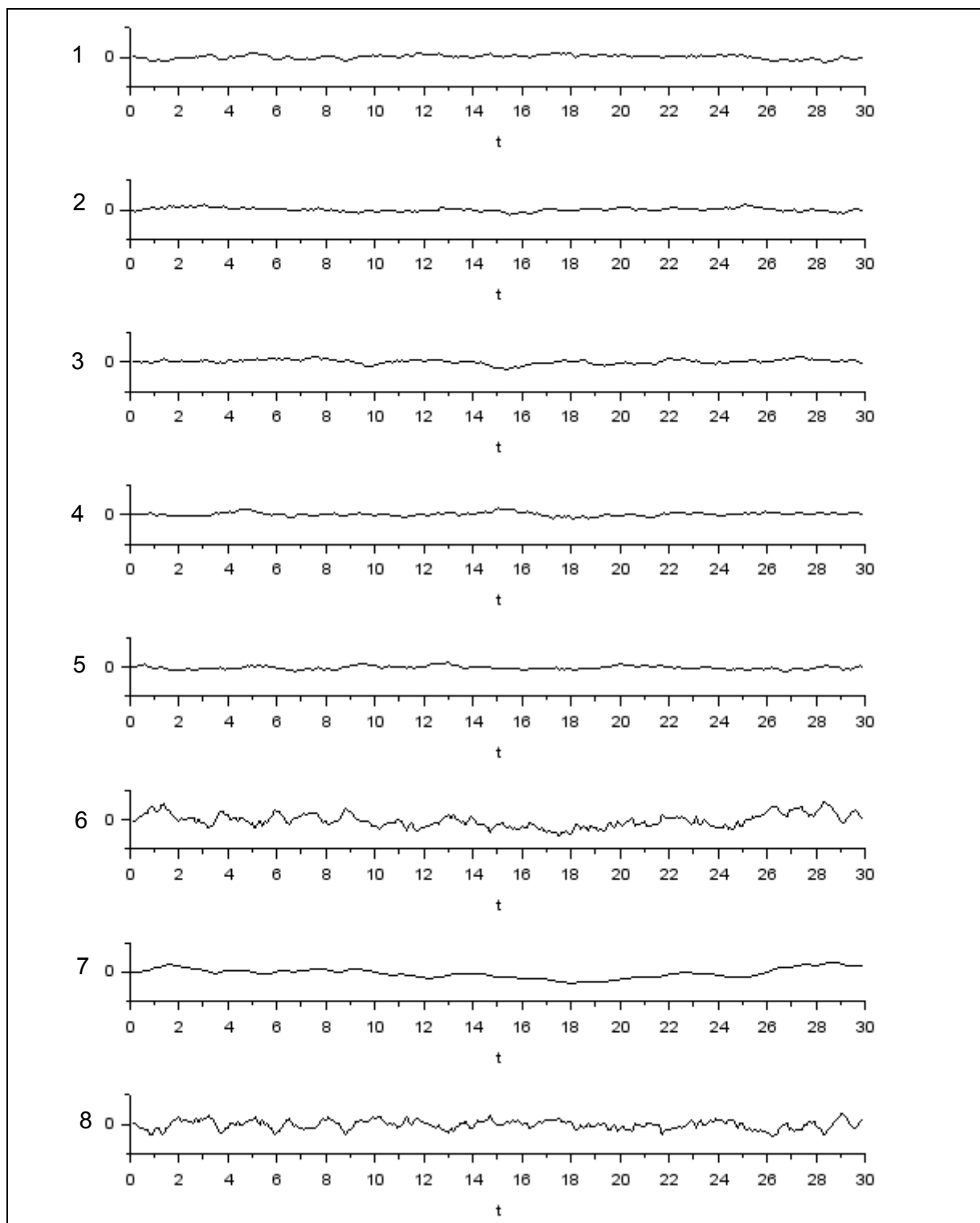


Рис. 7. Результати моделювання роботи предиктора

### Висновки

В роботі удосконалено метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з неперервними об'єктами, який ґрунтується на моделі РКФС з неперервним виробничим об'єктом і ресурсним керуванням станом і просторово-часовому спектрі станів і збурень, який дозволяє оптимізувати координацію керування на інтервалі кореляції впливів. Особливістю методу є врахування не тільки часової, але й просторової спектральної щільності потужності станів об'єкта і впливів на нього. Метод реалізовано у середовищі Наукові праці ВНТУ, 2022, № 3

Scilab. Моделювання системи з чотирьох керуваних елементів показало, що прогноз забезпечує  $RMSE=14\%$ , що прийнятно для використання результатів прогнозування для цілей координаційного керування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимофеева Н. М. Рекомендации по технологическому прогнозированию / Н. М. Тимофеева. – М. : Академия прогнозирования, 2003. – 257 с.
2. Растринг Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растринг. – Рига : Зинатне, 1981. – 375 с.
3. Базаров В. А. Капиталистические циклы и восстановительный процесс хозяйства в СССР / В. А. Базаров. – Плановое хозяйство, 1927. – 189 с.
4. Аналіз особливостей застосування та класифікація методів прогнозування у сфері розвитку мереж та телекомунікаційних технологій / Д. О. Перегудов, О. В. Селюков, В. В. Крихта [та ін.] // Вісник ДУІКТ. – 2009. – № 7 (1). – С. 27 – 40.
5. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А. Г. Ивахненко. – Киев : Техніка, 1975. – 312 с.
6. Теоретико-методологічні аспекти соціально-політичних прогностичних досліджень / С. І. Вировий, Н. П. Дяченко // Актуальні проблеми державного керування. – 2013. – № 2. – С. 138 – 143. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdy\\_2013\\_2\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdy_2013_2_20).
7. Дубовой В. М. Дослідження стійкості та збіжності децентралізованої координації локальних систем керування розподіленими кібер-фізичними системами / В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук // Вісник ВПІ. – 2021. – Вип. 4, Сер 2021. – С. 62 – 69. doi: 10.31649/1997-9266-2021-157-4-62-69.
8. Дубовой В. М. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами : [монографія] / В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 230 с.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2022.

Стаття пройшла рецензування 25.09.2022.

**Юхимчук Марія Сергіївна** – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: [umcmasha@gmail.com](mailto:umcmasha@gmail.com).

Вінницький національний технічний університет.