

Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 004.31, 004.056.55, 003.26

А.Л. Берднікова, Ю.С. Манжос

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Розглянуто та проведено порівняльний аналіз підходів до моделювання складних систем (СС), до яких можливо віднести соціально-економічні системи (СЕС) заснованих як на статистичних характеристиках процесів так ймовірнісних моделях з використанням детермінованого та стохастичного підходів. Сформовано вимоги до інформаційної технології адаптованого моделювання СС. Показано, що диверсифікація дозволяє підняти достовірність прогнозу. Показано, що комплексування методів аналітичного моделювання з засобами штучного інтелекту (штучними нейронними мережами) забезпечує необхідну якість прогнозу, а використання реальних даних про стан СС як початкових даних для аналітичної моделі зменшує похибку результату. Наведено узагальнену функціональну модель інформаційної технології, що дозволяє з високою достовірністю прогнозувати шляхом моделювання стан складних соціально-економічних систем. Запропонований підхід дозволяє знизити системні ризики обумовлені незбалансованістю окремих ланок.

Ключові слова: диверсифікація, математична модель, складна система, штучна нейрона мережа.

Вступ

З великою впевненістю можливо визначити, що сучасне життя базується на узгодженому функціонуванні складних систем (СС), до яких слід віднести технологічні, енергетичні та соціально-економічні. Через фундаментальну нестабільність, що властива СС, найменша диспропорція може призвести до значних втрат, що можуть бути як матеріальними, так і людськими [1]. Ось чому прогнозування певних ризиків у розвитку стану сучасних СС є дуже актуальним. Одним із засобів прогнозування є моделювання. Відомо багато підходів до моделювання СС. Найпоширенішими є математичні моделі (ММ), що є найзручнішим, математичним поданням реальності [2], а сам процес побудови та дослідження ММ носить назву математичного моделювання. У більшості випадків сучасні науки замінюють дослідження реального об'єкта або системи дослідженням його ММ, бо ММ – це еквівалент об'єкту, що віддзеркалює у математичній формі його найважливіші властивості та зв'язки, що властиві його складовим частинам [3].

Нажаль побудова адекватної моделі можлива тільки для повністю визначених СС, а для реальних систем ми завжди маємо певне наближення, що найчастіше визначається системою певних алгебраїчних [4] чи диференціальних рівнянь [5]. Тільки у найпростіших випадках, або при суттєвих спрощеннях, можливий точний довгостроковий прогноз стану СС. Точний прогноз стану СС на великий проміжок часу неможливий через наявність фундаментальної хаотичної складової [6], тому низька достовірність прогнозу є певною проблемою.

Існує також підходи до моделювання стану СС, засновані на використанні комп'ютерів. Один з підходів, що носить назву імітаційного моделювання, потребує побудови програмної моделі взаємодії всіх елементів СС [7]. Недоліком такого підходу є необхідність знання як складу СС, так і законів взаємодії її елементів. Інший підхід використовує методи та засоби штучного інтелекту, що моделюють поведінку нейронів головного мозку шляхом створення штучних нейронних мереж [8]. Відомо, що нейронні мережі здатні не тільки моделювати поведінку СС, але й апроксимувати будь-яку функціональну залежність [9] що і є основою їх застосування у ідентифікації та прогнозуванні стану СС.

Для розв'язання проблеми низької достовірності прогнозу пропонується диверсифікація моделювання, заснована на комплексному використанні кількох математичних та нейро-мережевої моделі з постійним уточненням моделей на підставі реальних даних. Метою даної статті є уточнення складу математичних моделей та побудова функціональної декомпозиції інформаційної технології моделювання стану СС.

Класифікація моделей

Будь-яка класифікація має будуватися за певними ознаками. Розглянемо класифікацію математичних моделей на підставі математичних засобів, що вони використовують. У цьому випадку існують такі класи ММ:

– лінійні та нелінійні ММ [10], що використовують лінійний та нелінійний математичний апарат. Прикладом таких моделей може бути балансова модель [11];

– зосереджені та роззосереджені, що використовують відповідно диференційні рівняння у звичайних та часткових похідних. До роззосереджених також відносять ММ, що використовують звичайні чи інтегральні рівняння з аргументами, що затримуються [12];

– стохастичні та детерміновані, тобто ММ що відповідно враховують чи ні вплив випадкових спотворень [13, 14];

– статичні та динамічні, що відповідно моделюють стан у будь-який момент часу, або поведінку СС [15];

– дискретні, неперервні та дискретно-неперервний.

За способом подання СС, що моделюється ММ розподіляються на:

– структурні або функціональні моделі, що відповідно розглядають тільки внутрішню структуру СС, або тільки зовнішню поведінку [5];

– концептуальні моделі [16];

– процесні моделі [17].

Обґрунтування складу математичних моделей

Сучасна СЕС складається з великої кількості різноманітних ланок, найголовнішою з яких є населення, що споживає певні товари та послуги, які пропонує реальний сектор економіки, освіта, що готує фахівців для реального сектору, держава, що фінансує освіту та надає субсидії, пенсії для певних верст населення, а також інвестує реальний сектор тощо. Всі ланки зв'язані між собою певними відношеннями, незбалансованість яких призводить до ризиків, наприклад, занадто низькому рівню життя, перевиробництву або дефіциту певних категорій товарів послуг або фахівців.

Зменшення ризиків можливо завдяки моделюванню з метою прогнозування їх подальшого розвитку.

Відомо багато підходів що використовують в моделюванні СЕС. Найпростіший з них базується на регресійному аналізі [4] і дозволяє, на підставі певних статистичних даних, прогнозувати розвиток будь-яких характеристик. Недоліком методу є використання певної апроксимації та значна похибка прогнозу.

Інший підхід, заснований на побудові аналітичних моделей, що використовують систему диференційних рівнянь Вольтерра. При цьому взаємодія окремих об'єктів моделюється за схемою «Хижак-жертва» [18]. Недоліком таких моделей є відсутність моделювання затримки. Розвитку хижаків та жертв, а також постулювання законів змін кількості об'єктів, що взаємодіють. Крім того такий підхід не дозволяє враховувати вплив стохастичних факторів на розвиток окремих ланок СЕС.

Існує клас математичних моделей, що враховують вплив стохастичних факторів та дозволяють побудувати систему ймовірнісних алгебро-диференційних рівнянь Колмогорова [14]. Побудова такої моделі потребує знання не тільки основних

ланок СЕС але й їх можливих станів. Розв'язання системи рівнянь на підставі початкових значень відповідних ймовірностей дозволяє знайти ймовірності знаходження системи в певному стані, як у стаціонарному так перехідному режимі на підставі початкових значень відповідних ймовірностей. Недоліком моделі є обмеженість її застосування тільки системами з обмеженими характеристиками, наприклад, стаціонарними системами математичне очікування параметрів яких змінюється у часі не може бути промодельованим. Реальні СЕС є нестационарними системами і використання таких моделей можливо тільки на дуже малих часових інтервалах.

Існують також математичні моделі [19], що враховують вплив стохастичних факторів на розвиток системи. В основі таких моделей є використання стохастичних рівнянь, що визначають розвиток певних параметрів СЕС. Стохастичні моделі дозволяють отримати не тільки прогнозне значення але й кореляційні функції, що визначають для цих параметрів. Залежність достовірності прогнозу від його терміну. Досліджувати нестационарні системи, та враховувати як математичного очікування та дисперсії параметрів системи у часі. Недоліком таких систем є практична неможливість отримання аналітичних залежностей для параметрів реальних СЕС.

Підхід заснований на побудові імітаційних моделей [20], застосовується у багатьох галузях науки та техніки, потребує використання спеціальних інструментальних засобів або універсальних мов програмування, а також знання ймовірнісних характеристик та законів взаємодії окремих складових. Використання імітаційних моделей дозволяє отримати прогноз стану СС, достовірність якого залежить від адекватності прийнятих при моделюванні ймовірнісних законів параметрів системи.

Засоби штучного інтелекту також дозволяють виконати моделювання прогноз стану складних систем одним з таких засобів штучні нейронні мережі, які потребують певного навчання та дозволяють побудувати будь яку функцію, наприклад залежності деякого параметру системи від інших параметрів, на підставі теореми Колмогорова, яка визначає що будь яку функцію f , n аргументів, можливо виразити як подвійну суму функції h_{ij}

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}(x_j),$$

де h_{ij} – певний базис функції.

Матриця h_{ij} адаптується під час навчання.

Через те що жодна з моделей розглянутих класів не забезпечує необхідну достовірність прогнозування, пропонується використати підхід заснований на диверсифікації, тобто використання кількох різноманітних моделей:

1. Регресійної моделі, що будує на підставі початкових статистичних даних про стан СЕС, систему алгебраїчних рівнянь.

2. Аналітичну модель, що складається з двох окремих моделей. Першої, побудовану за схемою «хижак-жертва», яка за допомогою системи диференціальних рівнянь визначає взаємодію окремих елементів СС, та другої, стохастичної моделі, що враховує вплив випадкових факторів на розвиток СС.

3. Нейро-мережевої моделі, що є штучною мережею, яка з початку «навчається» на реальних статистичних даних, а потім для власної адаптації, використовує результати аналітичного моделювання.

Функціональна модель інформаційної технології адаптованого моделювання

Інформаційну технологію у першому наближенні можна подати як чорну скриньку, що за стандартом IDEF0 має назву діаграми контекстного рівня, яку подано на рис. 1. Вхідними є неповні дані

ні про стан елементів СС. Ці дані доступні на сайті Держстат управління України. Ці дані за допомогою математичних та нейромережевих методів перетворюються на прогнозований та поточний стан СС.

Ключовим елементом технології є використання комплексного підходу заснованого на кількох моделях. Перша, регресійна модель, використовується для верифікації результатів аналітичного моделювання, здійснюваного за схемою «жертва-хижак», що представляє собою системи диференціальних рівнянь, які відображають відношення між окремими елементами СС, що моделюється. Аналіз диференціальних рівнянь дозволяє визначити зони біфуркації та атрактори, що відповідають особливим зонам вектора стану СС, поведінка в яких якісно відрізняється. Функціональну декомпозицію першого рівня подано на рис. 2.

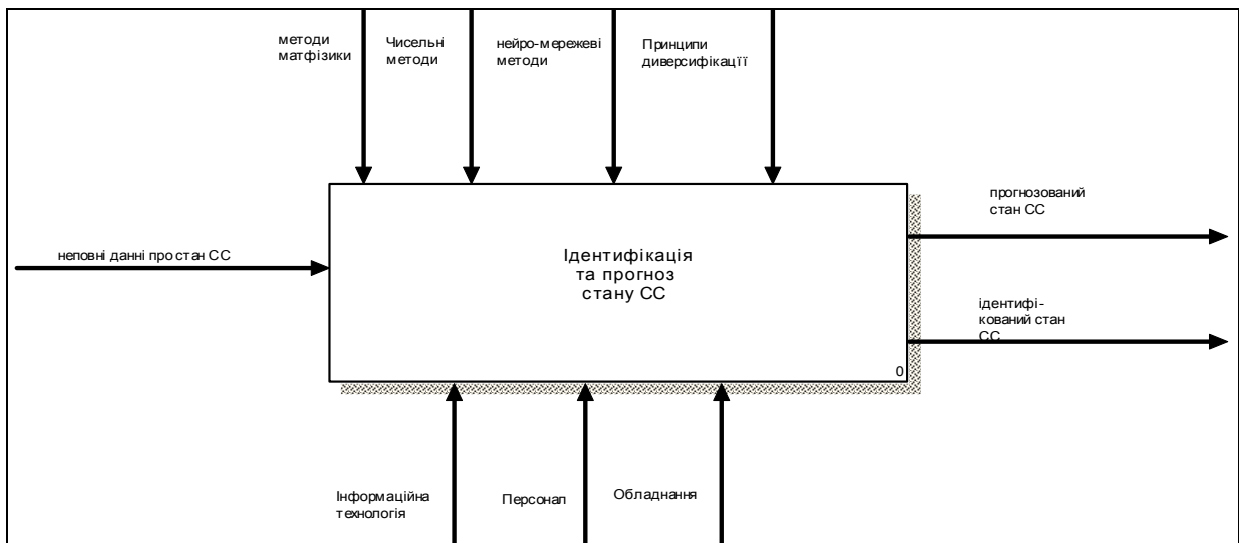


Рис. 1. ІТ контекстного рівня

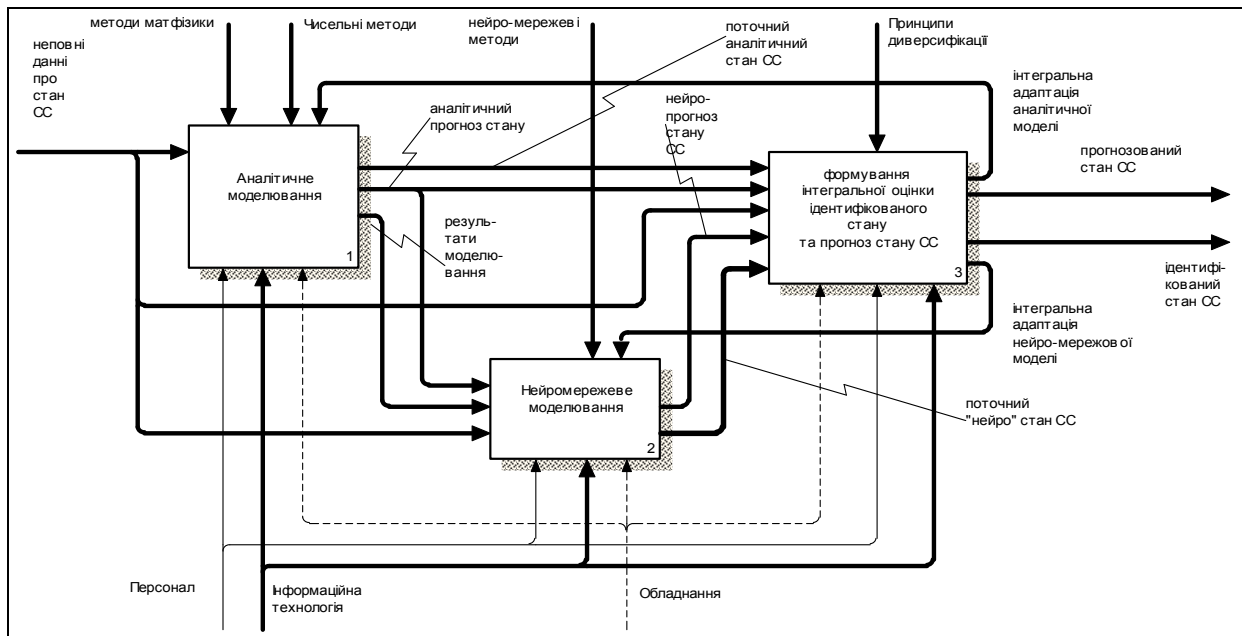


Рис. 2. Функціональна модель 1-го рівня ІТ адаптованого моделювання

Як видно з рис. 2 аналітичне моделювання формує поточний стан СС та прогноз стану системи, що моделюється. Результати моделювання досягаються завдяки використанню методів математичної фізики та чисельних методів. Поточний стан визначається на підставі неповних даних про стан СС та диференційних рівнянь. Прогнозні дані корегуються з використанням регресивної моделі. Підвищення достовірності моделювання досягається шляхом адаптації коефіцієнтів диференційних рівнянь за критерієм мінімальної середньоквадратичної розбіжності з вхідними даними що надходять з зовнішнього середовища. Крім того значення констант інтегрування отриманих після розв'язання системи диференційних рівнянь також змінюються для мінімізації розбіжностей з регресивною моделлю. Результати аналітичного моделювання надходять до штучної нейронної мережі, куди також подаються не повні вхідні дані про стан складної системи. Штучна нейронна мережа формує свої поточний та прогнозний вектор стану СС, що далі використовуються для формування інтегральної оцінки ідентифікованого стану та прогнозу стану СС. Сюди ж надходять дані аналітичного поточного та прогнозного стану складної системи. Для формування інтегральної оцінки використовуються також вхідні неповні дані. Після порівняння «нейро-мережевого» та аналітичного векторів з вхідними даними здійснюється додатково адаптація аналітичної нейромережевої моделі. На виході інформаційної технології формується поточний та прогнозований вектор стану СС, що відповідають максимальній достовірності (мінімальним розбіжностям).

Розглянемо далі детальніше аналітичне моделювання, що подано на рис. 3. На підставі неповних даних про стан СС формується регресивна модель, що являє собою спрощену функціональну залежність між параметрами стану СС. Ця модель використовується для адаптації аналітичної моделі побудованою за схемою «жертва-хижак». Вхідні дані

використовуються для формування початкових та граничних умов аналітичної моделі часовий інтервал інтегрування та початкові значення параметрів вектору стану СС. Початкові та граничні умови є складовою частиною аналітичної моделі. Система диференційних рівнянь з початковими та граничними умовами адаптується з використанням регресивної моделі при цьому корегуються деякі з функціональними залежностями між параметрами системи. Адаптована аналітична модель інтегрується чисельними методами. Результати чисельного інтегрування, разом з неповними вхідними даними використовуються для інтегральної оцінки аналітичного поточного та прогнозного стану СС. Крім того здійснюється також додаткова адаптація аналітичної моделі для зменшення розбіжності між результатами чисельного інтегрування та вхідними даними.

Особливості нейро-мережевого моделювання стану СС показано на рис. 4.

Як відомо штучні нейронні мережі дозволяють формувати досить складні функції шляхом адаптації навчання. Даний принцип використано для нейро-мережевого стану СС. Навчання штучної мережі здійснюється на підставі аналітичного прогнозу та вхідних даних. Для адаптації мережі використовуються також результати аналітичного моделювання. Процес навчання, дозволяє сформувати штучну нейронну мережу, моделює розвиток складної системи з малою похибкою. На початковому етапі навчання штучної нейронної мережі можливо за допомогою даних Держкомстату в Україні.

Результати нейро-мережевого та аналітичного моделювання використовується для формування інтегральної оцінки ідентифікованого поточного стану, тобто стану з повністю відомим вектором параметрів СС та прогнозного стану СС на певний часовий проміжок.

Функціональна декомпозиція інтегральної оцінки показана на рис. 5.

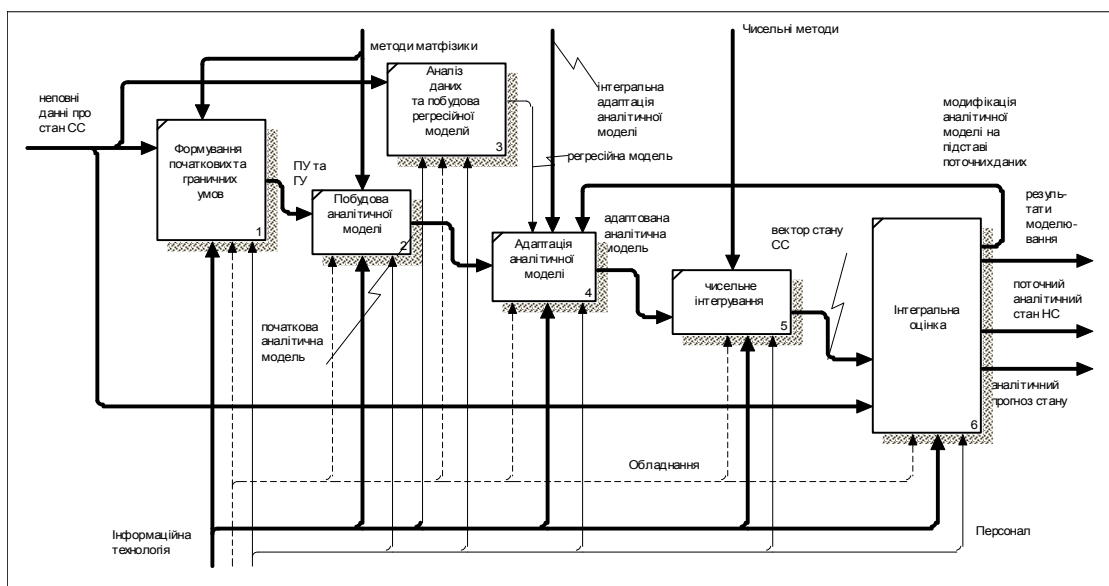


Рис. 3. Аналітичне моделювання

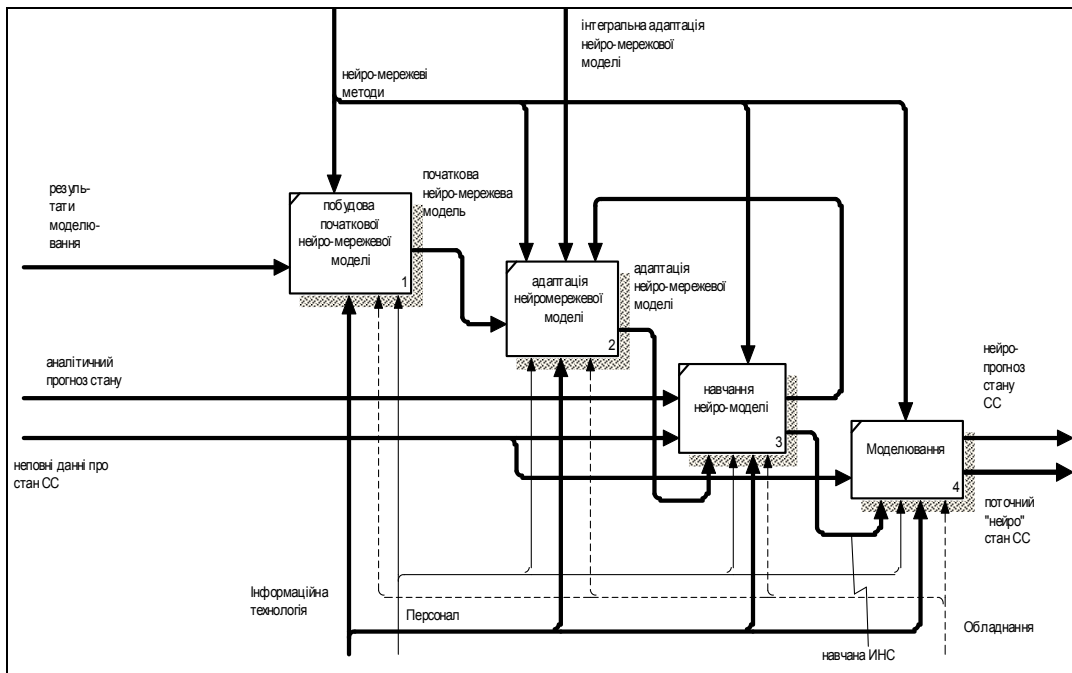


Рис. 4. Нейро-мережеве моделювання стану СС

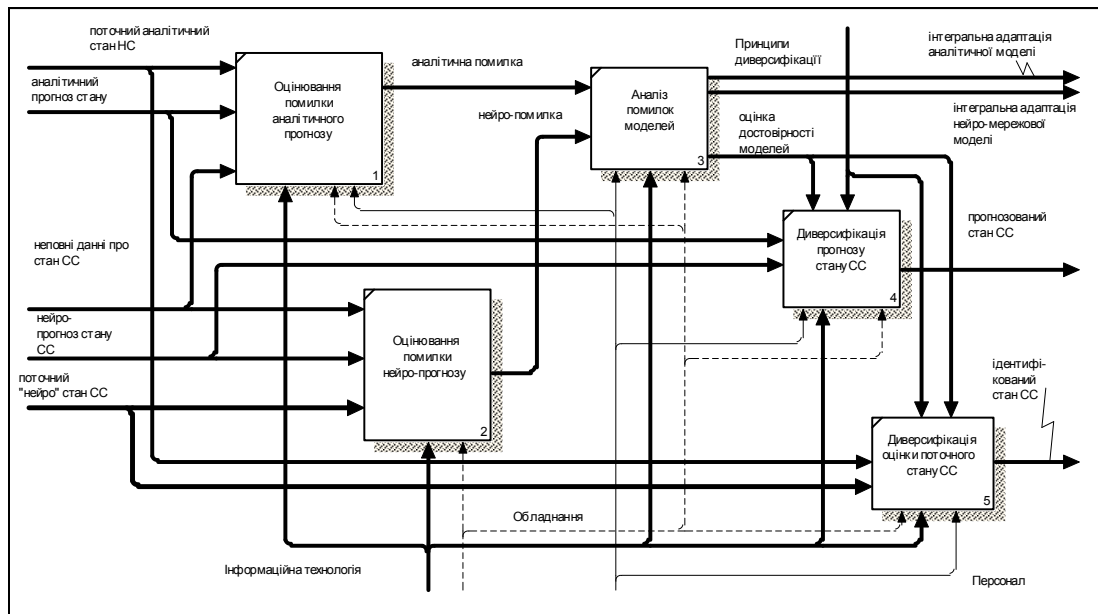


Рис. 5. Формування інтегральної оцінки ідентифікованого стану та прогнозу стану СС

На першому етапі оцінювання помилки аналітичного прогнозу здійснюється шляхом порівняння аналітичних векторів стану з реальними вхідними даними про стан СС. Це дозволяє зформувати так звану аналітичну помилку. Результати нейрон прогнозу разом з вхідними даними дозволяють оцінити реальну помилку нейрон прогнозу. Так звану нейро помилку. Аналіз помилок дозволяє адаптувати аналітичну та нейро-мережеву моделі. Крім того, аналіз помилок використаних моделей дозволяє оцінити їх достовірності та обрати найбільш достовірний прогнозний та ідентифікований стан СС.

Одним із шляхів зменшення ризиків СЕС є диверсифікація моделей. Вважаємо, доцільним побу-

дувати модель на системі рівнянь Вольтера, чисельне інтегрування якої на підстав початкових умов отриманих з Держстат України дозволить отримати прогноз параметрів СЕС на певний інтервал часу. Аналіз яких з відповідними показниками Держстат України дозволить адаптувати модель «хижак-жертва» і мати більш достовірний прогноз.

Висновки

В роботі показано важливість прогнозування стану СС, що дозволяє зменшити ризики матеріальних та людських втрат через неузгодженість розвитку окремих елементів. Проведено аналіз основних методів математичного моделювання складних сис-

тем. Обґрунтовано склад математичних моделей, комплексне використання яких забезпечує високу достовірність моделювання розвитку СС.

Розглянуто детально функціональну модель інформаційної технології адаптованого моделювання розвитку складної системи, використання якої дозволить зменшити ризики пов'язані з матеріальними та людськими тратами.

Подальші наукові дослідження будуть зосереджуватися на побудові детальної аналітичної моделі, що за допомогою системи диференціальних рівнянь визначає закони розвитку системи. Якісний аналіз такої моделі дозволить визначити зони ризику, що визначають такі області у гіперпросторі параметрів стану СС, в яких можливі з великою ймовірністю матеріальні та людські втрати.

Окремою проблемою є комплексне використання штучної нейронної мережі та аналітичної моделі.

Це потребує розвитку відповідних елементів інформаційної технології. Розв'язання перелічених проблем планується опублікувати в наступних роботах.

Список літератури

1. Dave Macdonald // *Practical Industrial Safety, Risk Assessment and Shutdown Systems*, Publisher: Elsevier Science & Technology Books Pub. Date: January 2004. – P. 354.
2. *A mathematical representation of reality*. Encyclopaedia Britanica [Електронний ресурс]. – Редим доступа: <http://www.encyclopaedia.britanica/>
3. Самарский А.А. *Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры* / А.А. Самарский, А.П. Михайлов / – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 564 с.
4. Chiang C.L. *Statistical methods of analysis* / C.L. Chiang // *World Scientific*. – 2003. – Section 9.7.4 "Interpolation" – P. 274.
5. Мышкис А.Д. *Элементы теории математических моделей* / А.Д. Мышкис. – 3-е изд., испр. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
6. Безручко Б.П. *Математическое моделирование и хаотические временные ряды* / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ "Колледж", 2005. – ISBN 5-94409-045-6.
7. Leigh Tesfatsion *"Agent-based Computational Economics: Modeling Economies as Complex Adaptive Systems* // *Information Sciences*. – 2003. – 149 (4). – P. 262-268.

8. Hopfield J.J. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities* / J.J. Hopfield // *Proc. Natl. Acad. Sci. – USA, April 1982 Biophysics*. – Vol. 79. – P. 2554-2558.

9. Arbib Michael A. (1995). *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* / Michael A. Arbib. – 1995. – 666 p.

10. Данилов Ю.А. *Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение* / Ю.А. Данилов // *Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»*. – 2 изд. – М.: URSS, 2006. – 208 с.

11. Ведута Н.И. *Социально эффективная экономика* / Н.И. Ведута; под ред. Е.Н. Ведута. – М.: РЭА, 1999. – 254 с.

12. Анищенко В.С. *Динамические системы* / В.С. Анищенко // *Соросовский образовательный журнал*. – 1997. – № 11. – С. 77-84.

13. Советов Б.Я. *Моделирование систем: учеб. для вузов* / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

14. Вентцель Е.С. *Теория случайных процессов и её инженерные приложения: учебное пособие для вузов* / Е.С. Вентцель, Е.А. Овчаров. – 2-е изд. стереотипное. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.

15. *Введение в математическое моделирование: учебное пособие* / Под ред. П.В. Трусова. – М.: Логос, 2004. – 460 с.

16. Блехман И.И. *Прикладная математика: Предмет, логика, особенности подходов. С примерами из механики: учебное пособие* / И.И. Блехман, А.Д. Мышкис, Н.Г. Пановко. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: УРСС, 2006. – 376 с.

17. Маклаков В. *BPwin и ERwin. CASE – средства разработки информационных систем* / В. Маклаков. – М.: Диалог-МИФИ, 2000. – 256 с.

18. Арнольд В.И. *Жёсткие и мягкие математические модели* / В.И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2004. – 560 с.

19. Оксендаль Б. *Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения* / Б. Оксендаль. – 2003. – 440 с.

20. *Handbook of Computational Economics* / Hans M. Amman, David A. Kendrick, and John Rust, ed. – 1996. – V. 1, Elsevier. *Description & chapter-preview*. Kenneth L. Judd, 1998. *Numerical Methods in Economics*, MIT Press. *Links to description and chapter previews*.

Надійшла до редколегії 14.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Божко, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

А.Л. Бердникова, Ю.С. Манжос

Рассмотрено и проведено сравнительный анализ математических моделей, применяемых при прогнозировании состояния сложных систем. Показано, преимущество комплексного использования нескольких видов моделей. Приведена функциональная декомпозиция информационной технологии адаптированного моделирования. Обоснован выбор моделей использованных информационных технологий. Показаны основные проблемы связанные с реализацией информационной технологии адаптированного моделирования.

Ключевые слова: диверсификация, искусственная нейронная сеть, математическая модель, сложная система.

INFORMATION TECHNOLOGY FOR MODELING OF COMPLEX SYSTEM

A.L. Berdnikova, Y.S. Manzhos

Comparative analysis of mathematical models used for prediction of Complex system's state is formed. According to Results of work the using of several kind models has an advance before using of along model. The main result of this article is a functional decomposition of IT for adaptive modelling. IT includes two kind of models: analytical model based on Regression equation and Volterra's differential equations; artificial neural-network. The main problems of IT for adaptive modelling is formed.

Keywords: mathematical model, complex system, artificial neural-network, diversification.