УДК 528.48 DOI:10.36910/6775-2410-6208-2021-5(15)-12

ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНОМУ МОНІТОРИНГУ СПОРУД

PRINCIPLES OF MODELING DYNAMIC SYSTEMS FOR GEODETIC MONITORING OF STRUCTURES

Уль А.В. д.т.н., професор, Мельник О.В. к.т.н., доцент, Рудик О.В., ст. викл. (Волинський національний університет імені Лесі Українки), Мельник Ю.А., к.т.н., доцент, Синій С.В., к.т.н., доцент (Луцький національний технічний університет)

Uhl A.V. Dr.Tech, Professor, Melnyk O.V. PhD in Engineering, associate professor, Rudyk O.V., senior lecturer (Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk), Melnyk Yu.A., PhD in Engineering, associate professor, Synii S.V. Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)

Моделювання є одним із найпотужніших засобів дослідження, зокрема, складних динамічних систем. Основна мета при побудові моделі – забезпечити дослідження та аналіз функціонування реального об’єкта. Об’єкт реального світу має величезну кількість властивостей і характеристик, особливо коли мова йде про складні інженерні об'єкти, однак дослідників цікавить невелика та скінченна їх частина. Тому перед дослідниками постає задача виділити ці основні властивості й перенести їх на модель.

В даній роботі пропонується розглядати деформаційний стан ґрунтової греблі Хмельницької АЕС як стан динамічної системи.

Modeling is one of the most powerful means of research, including complex dynamic systems. Modeling makes it possible to perform computational experiments with systems at the design stage, as well as to study systems with which real experiments are unprofitable due to danger or high cost. At the same time, due to its proximity in form to physical modeling, this research method is available to a wide range of users.

Depending on the system behavior in the time space lagless to distinguish between inertial and dynamic system. Physically due to inertial systems that often occur in engineering and construction surveying accumulate energy coming from input values.

Therefore, it is proposed to consider the dynamic system as a "Black Box". This method first determines the still unknown transfer characteristic of the system only through a number of parameters of the input values and reaction values.

Various computer studies of dynamic models, according to Volterra's theory in the time range, as well as various models in the frequency range have shown that these models can not solve the problem. These models give high-quality models in the mathematical sense, but contradict without exception the physical laws of deformation processes contained in the geodetic field of observation.

In practice, a modified discrete model is often used, which without violating the physical laws of the nonlinear Volterra model has approximately equivalent accuracy.

In this paper, it is proposed to consider the deformation state of the soil dam of Khmelnitsky NPP as a state of a dynamic system. The use of such a model in mathematical terms is highly effective. Compliance with the physical laws of deformation processes is one of the priorities in addressing the simulation. Particular attention should be paid to this fact.

Ключові слова: інженерна геодезія, моніторинг споруд, динамічні системи, моделювання .

Key words: engineering geodesy, construction monitoring, dynamic systems, modeling.

Аналіз останніх досліджень та постановка задачі. Моделювання є одним із найперспективніших засобів дослідження інженерно-геодезичних деформацій, наприклад, складних динамічних систем. На стадії проектування воно уможливлює проведення складних обчислювальних експериментів та проведення натурних експериментів, які неможливо здійснювати іншими прикладними дослідженнями. Методи моделювання динамічних систем доступні широкому загалу користувачів завдяки близькості за формою до фізичного моделювання.

Основна мета дослідження – побудова моделі та проведення математичного аналізу функціонування інженерних споруд, які піддаються багатофакторному впливу. Для дослідника важливо виділити основні властивості та впровадити їх при розробці моделі.

Методологічні основи рішення проблеми моделювання та ідентифікації складних динамічних систем широко представлені в літературі [1, 2]. Реалізацію деяких ідей цих робіт у застосуванні до задач геодезії та будівництва здійснили [3,4,5].

В даній роботі пропонується розглядати деформаційний стан ґрунтової греблі Хмельницької АЕС як стан динамічної системи.

Виклад основного матеріалу

Під динамічною системою розуміють структуру, яка через величини, залежні від часу, знаходиться у взаємозв'язку з її оточенням. Як причинний наслідок впливу параметрів на систему, виникають деформації (зміщення, осідання, поворот тощо), рис. 1.

В залежності від поведінки системи в часовому просторі слід розрізняти безінерційні і інерційні динамічні системи. Фізично обумовлені інерційні системи, які найчастіше зустрічаються в інженерній геодезії та будівництві акумулювати енергію, що надходить з вхідними величинами. Показники реакції і/або деформації на момент $t_i = i \cdot \Delta t$ є не лише наслідком параметру (n) на той самий момент, але й попередніх показників. На противагу інерційним динамічним системам в безінерційних системах величина реакції на момент t_i залежить виключно від параметрів на той самий момент.

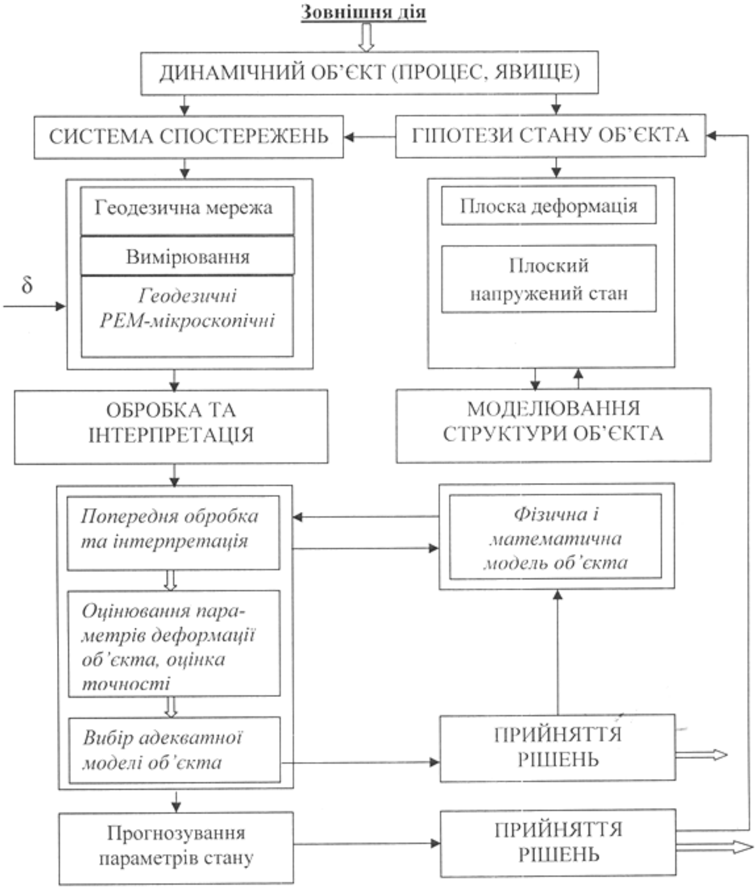

Рис. 1. Функціональна схема розв'язку задач ідентифікації деформацій складних динамічних об'єктів

Перш за все постає принципове питання розробки моделі. Так як відомі лише незначні знання про внутрішні та зовнішні зв'язки процесу деформації і можливий загальноприйнятий метод для найрізноманітніших об'єктів дослідження, застосування моделювання, що ґрунтується виключно на фізичних законах, майже неможливе. Тому пропонується розглядати динамічну систему як «Black Box» («чорний ящик»). За цим методом спочатку визначається ще невідома передаточна характеристика системи виключно через ряд параметрів вхідних величин і величин реакції.

Згідно теорії Вольтерра [6,7] поведінку складних динамічних систем можна описати так:

$$\hat{y}(t) = g_0 + \int_0^\infty g_1(\tau_1)x(t-\tau_1)d\tau_1 +$$

$$+\int_0^\infty\int_0^\infty g_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 +$$

$$+\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty g_1(\tau_1,\tau_2,\tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)\times x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 ... \tag{1}$$

$$\hat{y}(t) = g_0 + \sum_{S=1}^{\infty}\left\{\int_{\tau_1=0}^{\infty}...\int_{\tau_S=0}^{\infty} g_S(\tau_1,...,\tau_S)x(t-\tau_1)...x(t-\tau_S)d\tau_1...d\tau_S\right\}.$$

Або в дискретному вигляді

$$\hat{y}(i\Delta t) = g_0 - \sum_{k=1}^{m} a_k y\left[(i-k)\Delta t\right] + \sum_{j=0}^{m} b_j x\left[(i-j)\Delta t\right]. \tag{2}$$

Різноманітні комп’ютерні дослідження динамічних моделей, згідно теорії Вольтерра [6,7] (1), (2) в часовому діапазоні, а також різні моделі в діапазоні частот показали, що за допомогою цих моделей поставлені завдання вирішити не можна. Названі моделі дають високоякісні моделі в математичному сенсі, проте суперечать без виключення фізичним закономірностям процесів деформації, що містяться в геодезичному полі спостереження. Як правило, рівняння (1) не підходить для практичного використання, оскільки воно розраховане на нескінченні реєстрації. У зв’язку з тим, що на практиці існують всі майже завжди дискретні ряди поміряних значень із кінцевими довжинами, то потрібний відповідний перехід від багатократних інтегралів, заданих у рівнянні (1) до багатократної суми (2).

На практиці часто застосовується модифікована дискретна модель, яка без порушення фізичних закономірностей нелінійної моделі Вольтерра має приблизно еквівалентну точність:

$$y_k(i\Delta t) \approx f\left\{x_j\left[(i-l)\Delta t\right]\right\}, \tag{3}$$

де $k = 1, 2, ..., r;\ \ j = 1, 2, ..., s;\ \ i = m, ..., N;\ \ l = 0, 1, ..., m.$

Змінні величини r і s вказують кількість вхідних величин і компонентів деформації, m - це критерій для інерції (об’єм пам’яті) системи, N визначає кількість поміряних величин ряду.

Для спрощення моделі здійснюється лінеаризація розкладом в ряд Тейлора, обмежуючись членами першого або другого порядку:

$$\hat{y}\left(i\Delta t\right)=\sum_{l_1=0}^{m} g_1\left(l_1\right)x\left[\left(i-l_1\right)\Delta t\right]+g_2\left(k,l\right)x^2\left[\left(i-k\right)\Delta t\right]. \quad (4)$$

З метою наочності обмежимося у формулі (4) вхідними величинами та компонентами деформації, що є типовим для геодезичної практики. Величина k представляє в (4) тимчасове запізнення.

При цьому отримується дискретна, нелінійна, обтяжена інерцією динамічна модель у формі:

$$\hat{y}\left(i\Delta t\right)=g_0+\sum_{S=1}^{M}\left\{\sum_{l_1=0}^{M}\ldots\sum_{l_S=0}^{M} g_S\left(i\ldots i_1\right)\Delta t\ldots x\left(i\ldots l_S\right)\right\}. \quad (5)$$

Дана модель включає наступні особливі випадки:

- дискретна лінійна обтяжена інерцією динамічна модель (M=1);
- дискретна, нелінійна, вільна від інерції динамічна модель (m=0) ;
- дискретна, лінійна, вільна від інерції динамічна модель (M=1,m=0). Невідомі величини представляють собою функціонали Volterra (Вольтерра) $g_S\left(\tau_1,\ldots,\tau_S\right)$ в неперервному ряді. За допомогою визначення цих невідомих, що є завданням ідентифікації, можна здійснити апроксимацію динамічної системи.

В залежності від порядку моделі M, моделі, що задані у рівняннях (1) і (2) можна отримати на різні часткові моделі (рис. 2):

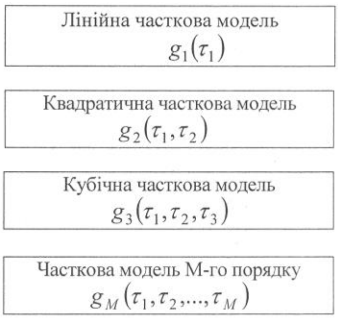

Рис.2. Концептуальна схема нелінійної динамічної моделі

Достовірність динамічних моделей залежить від їх порядку. Відомо, що при цьому різко зростає кількість NN невідомих ядер Вольтерра

$$g_S\left(l_1\ldots l_S\right): \quad NN=1+\sum_{i=1}^{M}\left(m+1\right).$$

Наприклад, якщо M=1, m=5 величина пам’яті складає 7, при M=4, m=10 величина пам’яті становить 16259.

Лінійна динамічна модель зі зворотнім зв'язком.

В контексті викладеного розглянемо лінійну динамічну систему (модель). Якщо до формулювання модельного підходу прийняти додаткову умову залежності реакції системи (деформації) в точці часу $t_i = i\Delta t$ від вхідних реакцій:

$$y(i\Delta t) = f\left\{\begin{matrix} y([i-1]\Delta t), y([i-2]\Delta t), ..., y\{[i-m]\Delta t\} \\ x(i\Delta t), x\{[i-1]\Delta t\}, ..., x\{[i-m]\Delta t\} \end{matrix}\right\} \qquad (6)$$

через розкладання в ряд переходимо до узагальненої лінійної моделі:

$$\hat{y}(i\Delta t) = \sum_{k=i}^{m} -aky([i-k]\Delta t) + g_0 + \sum_{j=i}^{m} b_j x([i-j]\Delta t). \qquad (7)$$

Ця модель містить ефект зворотнього зв'язку, коли реакції у вищезгаданих часових пунктах впливають на систему як додаткові величини впливу.

Таким чином, досягається ефект фізично коректної повної ідентифікації. Цей не набагато покращений з математичної точки зору результат є добрим "стартовим значенням" для обчислення кінцевих значень моделі $\hat{y}(i\Delta t)$. Ця стартова величина є поміряним значенням реакції системи в точці часу $t_{i-1} = [...]\Delta t$, яке не дуже відрізняється від $y(i\Delta t)$.

В практиці геодезичних спостережень за інженерними об'єктами переважно мало систем із структурою зворотнього зв'язку. Відповідно нами за даними [8] був виконаний модельний експеримент.

Для апробації був вибраний нескладний варіант, в якому враховувалися для величин впливу 1 - температури у двох значеннях, для величини впливу 2 – довжина об’єкту. Для цього випадку динамічна модель має такий вигляд:

$$\begin{gathered} y(i\Delta t) \approx \hat{y}(i\Delta t) = g_0 + a_1 y([i-1]\Delta t) + a_2 y([i-2]\Delta t) + \\ + b_1 x_1(i\Delta t) + b_2 x_2([i-1]\Delta t) + b_3 x_1([i-2]\Delta t). \end{gathered} \qquad (8)$$

Отримано наступні значення:

$$g_0 = 1,35 \cdot 10^{-5},\ a_1 = 0,999887,\ a_2 = 6,93 \cdot 10^{-5},$$

$$b_1 = 1,13 \cdot 10^{-7},\ b_2 = -2,94 \cdot 10^{-5},\ b_3 = -5,79 \cdot 10^{-9}.$$

Результуюча середньоквадратична помилка вихідного значення моделі становить 2,5х10^{-5} мм, а відповідна відносна помилка – 0,001%.

Висновки

Використання такої моделі в математичному змісті є високо ефективною моделлю. Проте врахована мала кількість невідомих при відносно малих затратах, що суперечить фізичній суті деформаційного процесу. Зрозуміло, що дотримання фізичних закономірностей деформаційних процесів є одним з першочергових завдань у вирішенні проблем моделювання. Цьому факту слід приділяти особливу увагу.

References

1. Modeliuvannia dynamichnykh system : Navch. posib. / D. Ya. Khusainov, I. I. Kharchenko, A. V. Shatyrko; Kyiv. nats. un-t im. T.Shevchenka. K.: VPTs "Kyiv. un-t", 2011. 135 c. Bibliohr.: p. 67.

2. Verlan A. F. Matematycheskoe modelyrovanye neprerыvnыkh dynamycheskykh system / A. F. Verlan, S. S. Moskaliuk. K. : Naukova dumka, 1988. 287 p.

3. Shostak A.V. Pobudova reolohichnykh modelei pry inzhenerno-heodezychnomu modeliuvanni elementiv tekhnolohichnykh kompleksiv /A.V. Shostak, V.V Bozhydarnik, O.V. Melnyk // Scientific journal «TECHNOLOGICAL COMPLEXES» № 2(8), 2013 P. 91-94.

4. Mazurov B.T. Fyzyko-matematycheskoe modelyrovanye deformatsyonnыkh protsessov hotoviashchehosia vulkanycheskoho yzverzhenyia po kompleksnыm heodezycheskym y heofyzycheskym nabliudenyiam /B.T. Mazurov, V.K. Pankrushyn // Sb. materyalov mezhdunar. nauch. konhr. «HEO-SYBYR-2006». Novosybyrsk, 2006. T.3, Ch.2. P. 141-146.

5. Mazurov B.T. Ynterpretatsyia kompleksnykh heodezycheskykh y heofyzycheskykh nabliudenyi za napriazhenno-deformyrovannym sostoianyem heodynamycheskykh system/ Yu.Y. Kuznetsov, B.T. Mazurov, V.K. Pankrushyn, V.A. Seredovych // Problemy y perspektyvy razvytyia hornykh nauk. Tr. mezhdunar. konf. Novosybyrsk: Yn-t horn. dela SO RAN, 2005. P. 194 - 199.

6. Vito Volterra. Theory of Functionals and of Integrals and Integro-Differential Equations. Madrid 1927 (Spanish), translated version reprinted New York: Dover Publications, 1959.

7. Pirani M. Diagonal kernel point estimation of n-th order discrete Volterra-Wiener systems / Massimiliano Pirani, Simone Orcioni // EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 2004, no. 12, pp. 1807-1816.

8. Melnyk O. V. Kompleksne doslidzhennia deformatsiinykh protsesiv hruntovykh hrebel znachnoi protiazhnosti: dys. ... kand.tekhn.nauk : 05.24.01 / Melnyk O.V. Lutsk, 2013. 184 p.

Список використаної літератури

1. Моделювання динамічних систем: Навч. посіб. / Д. Я. Хусаінов, І. І. Харченко, А. В. Шатирко; Київ. нац. ун-т ім. Т.Шевченка. К.: ВПЦ "Київ. ун-т", 2011. 135 с. Бібліогр.: с. 67. - укр.

2. Верлань А. Ф. Математическое моделирование непрерывных динамических систем / А. Ф. Верлань, С. С. Москалюк. К.: Наукова думка, 1988. 287 с.

3. Шостак А.В. Побудова реологічних моделей при інженерно-геодезичному моделюванні елементів технологічних комплексів /А.В. Шостак, В.В Божидарнік, О.В. Мельник // Scientific journal «TECHNOLOGICAL COMPLEXES» № 2(8), 2013 P. 91-94.

4. Мазуров Б.Т. Физико-математическое моделирование деформационных процессов готовящегося вулканического извержения по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям /Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2006». Новосибирск, 2006. Т.3, Ч.2. С. 141-146.

5. Мазуров Б.Т. Интерпретация комплексных геодезических и геофизических наблюдений за напряженно-деформированным состоянием геодинамических систем/ Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, В.А. Середович// Проблемы и перспективы развития горных наук. Тр. междунар. конф. Новосибирск: Ин-т горн. дела СО РАН, 2005. С. 194 - 199.

6. Vito Volterra. Theory of Functionals and of Integrals and Integro-Differential Equations. Madrid 1927 (Spanish), translated version reprinted New York: Dover Publications, 1959.

7. Pirani M. Diagonal kernel point estimation of n-th order discrete Volterra-Wiener systems / Massimiliano Pirani, Simone Orcioni // EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 2004, no. 12, pp. 1807-1816.

8. Мельник О. В. Комплексне дослідження деформаційних процесів грунтових гребель значної протяжності: дис. ... канд.техн.наук : 05.24.01 / Мельник О.В. Луцьк, 2013. 184с.