ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 517.1:519.7:62-50 https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.2.1

Г. О. ДИМОВА
Херсонський державний аграрно-економічний університет
ORCID: 0000-0002-5294-1756

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ОБ'ЄКТА

Стаття присвячена обговоренню постановки задачі і схеми її розв'язання в найпростішому варіанті аналізу динамічної структури об'єкта – виділення в класі динамічних операторів $\{D_\alpha\}$, що враховується при цьому заздалегідь відомим, оператором D_0, відповідного статистичним властивостям зареєстрованого сигналу. На етапі аналізу – виділення класу – необхідно вирішити загальні питання: за апріорними даними про досліджуваний об'єкт обґрунтовано обираємо один з типів оператора (функціональний, диференціальний, інтегральний або інтегро-диференціальний). При цьому необхідно враховувати і попередню інформацію, отримувану з сигналу. При дослідженні нерегульованого об'єкта має значення те, що сигнали завжди описують поведінку об'єкта як цілого і відображують індивідуальні рухи великого числа його однотипних мікрочастин. Аналіз структури автономного об'єкта за його встановленим сигналом недостатній, якщо враховувати тільки динамічну залежність від часу, навіть сама детальна реєстрація єдиного розв'язання динамічного рівняння, що встановилося не дозволяє в реальних ситуаціях розкрити структуру оператора D_0.

Непристосованість звичайної схеми чорної скриньки для вивчення нерегульованого об'єкта за сигналом, що встановився, призводить до необхідності обліку внутрішніх флуктуацій в рівняннях сигналу об'єкта. Тому у статті обмежуємося розглядом автономних об'єктів, в динамічні рівняння яких час t у явному вигляді не входить. Сформульовано і обґрунтовано загальний простий принцип опису сигналу, властивості якого кількісно суттєві і регулярно проявляються за даних умов спостереження. Згідно основним положенням властивості сигналу зв'язуються між собою деякою динамічною структурою об'єкта. Дослідження статистичних властивостей відгуку динамічної системи на флуктуаційне обурення $F(t)$ дозволяє оцінювати за сигналом, що встановився, динамічні характеристики нерегульованого об'єкта.

Ключові слова: *чорна скринька, нерегульований об'єкт, фазовий простір, динамічна система, траєкторія, флуктуація, динамічний рух.*

H. O. DYMOVA
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0002-5294-1756

ANALYSIS OF THE DYNAMIC STRUCTURE OF THE OBJECT

The article is devoted to the discussion of the problem statement and the scheme of its solution in the simplest version of the analysis of the dynamic structure of an object - selection in the class of dynamic operators $\{D_\alpha\}$, taken into account in this case by a previously known operator D_0, corresponding to the statistical properties of the registered signal. At the stage of analysis - class selection - it is necessary to solve general issues: according to a priori data about the object under study, we reasonably choose one of the types of operator (functional, differential, integral or integro-differential). In this case, it is also necessary to take into account the preliminary information obtained from the signal. When studying an unregulated object, it is important that the signals always describe the behavior of the object as a whole and reflect the individual movements of a large number of its microparticles of the same type. An analysis of the structure of an autonomous object based on its set signal is insufficient if only the dynamic dependence on time is taken into account; even the most detailed registration of the steady-state unified solution of the dynamic equation does not allow revealing the structure of the operator D_0 in real situations.

The unsuitability of the usual black box scheme for studying an unregulated object from a steady signal leads to the need to take into account internal fluctuations in the plant signal equations. Therefore, in the article we confine ourselves to considering autonomous objects, the dynamic equations of which do not explicitly include the time t. A general simple principle for describing a signal is formulated and justified, the properties of which are quantitatively significant and regularly manifest themselves under given observation conditions. According to the main provisions, the properties of the signal are interconnected by some dynamic structure of the object. The study of the statistical properties of the response of a dynamic system to a fluctuation disturbance $F(t)$ makes it possible to estimate the dynamic characteristics of an unregulated object from a steady signal.

Key words: *black box, unregulated object, phase space, dynamic system, trajectory, dynamic motion.*

Постановка проблеми

Планування експерименту, розв'язання задач ідентифікації і прогнозування перебігу безперервних технологічних процесів, проблеми відновлення інформації, а також аналіз результатів пасивних спостережень зараз має більше значення при переході до дослідження все більш складних явищ. Традиційній схемі дослідження відповідає наступна послідовність операцій:

1) отримання експериментальних даних – це виявлення якісних сторін явища та побудова його моделі, написання рівнянь моделі та їх розв'язання;
2) зіставлення рішення з експериментами та уточнення моделі тощо.

Така схема дослідження виявляється не завжди доцільною. Для вивчення складних об'єктів, коли огляд результатів вимірювань стає проблемою, пропонують схему «чорної скриньки», в якій впливи на об'єкт описуються формально як набір збуджень. Цю схему, що виходить із регулярного зіставлення відгуків об'єкта на виході «чорної скриньки» зі збудженнями на її вході, характеризує інша послідовність операцій [1-2]:

1) вибір апріорного класу рівнянь моделі;
2) зіставлення відгуків зі збудженнями та отримання конкретних рівнянь моделі;
3) побудова моделі.

У найпростішому варіанті аналізується релаксація до стійкого граничного руху у відповідь на початкове відхилення. Задачу відшукання рівнянь моделі в принципі можна розв'язати, якщо збурення на вході «чорної скриньки» досить повні і дозволяють виявити у відгуках об'єкта всі його ступеня свободи, суттєві в явищі, що спостерігається. У роботі необхідно сформулювати і обґрунтувати загальний принцип опису сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз динамічної структури об'єкта відноситься до трьох відомих задач теорії сигналів: задач ідентифікації, коли на підставі відомих сигналів на вході і виході системи робиться висновок про склад системи і її характеристиках; задач управління, коли відомі характеристики системи і вхідного сигналу та визначається закон зміни сигналу на виході системи або такий вхідний сигнал, який на виході призводить систему в заданий стан; задач вимірювання, коли відомий вихідний сигнал і характеристики системи, визначаються характеристики вхідного сигналу. Теоретичною базою для розв'язання поставленої задачі стали роботи таких вчених: Г.Л. Ван Тріса, Р.Е. Калмана, Я.К. Віллемса, Д. Гропа.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є демонстрація природності та ефективності сформульованого принципу аналізу динамічної структури об'єкта як відправного пункту для різноманітних наукових досліджень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нехай протягом інтервалу спостереження $-\frac{\theta}{2} \le t < \frac{\theta}{2}$ реєструється сигнал $U(t;x)$ при різних значеннях параметрів $x_i \in \boldsymbol{x}_i \ (i = 1,2,\ldots,Q)$, що об'єднуються коротким позначенням $\mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, \ldots, x_Q)$. Тут будемо враховувати, що залежність сигналу від параметрів $\mathbf{x}$ динамічна. У дійсних величин x_i всіх разом і кожної окремо може бути самий різний «природний» сенс: значеннями x_i можуть виражатися розміри об'єкта, концентрації хімічних реагентів, швидкості кровотоку в судинах, показники галузей економіки тощо [2]. Насамкінець, значення x_i можуть складати і просто сукупність перших натуральних чисел – це призводить до найпростішого варіанту багатомірного сигналу

$$U(t;\mathrm{x}) \sim \left(U_1(t), U_2(t), \ldots, U_Q(t)\right).$$

Виділення тут і нижче часу t (або його аналога – фази) серед всіх $(Q+1)$ аргументів сигналу зв'язано з важливою для подальшого властивістю різноманітних залежностей від часу, згідно якої причина відповідає меншим значенням t, чим її наслідок. Як не важко збагнути, аналіз структури автономного об'єкта по його встановленому сигналу з урахуванням тільки динамічної залежності від часу недостатній: навіть сама детальна реєстрація єдиного рішення динамічного рівняння, що встановилося, $D_0[U;x] = 0$ не дозволяє в реальних ситуаціях розкрити структуру оператора D_0. Так, за положенням точки спокою $U \equiv 0$ найпростішого звичайного диференціального рівняння

$$\frac{d^q U_0}{dtq}(t) + \sum_{m=0}^{q-1} a_m \frac{d^m U_0}{dt^m}(t) = 0, \tag{1}$$

з початковими умовами: $\frac{d^m U_0}{dt^m}(0) = U_0^m, \quad m = 0,1,2,\ldots,q-1$, не тільки неможливо оцінити чисельні значення коефіцієнтів a_l з характеристичного рівняння $k^q + \sum_{l=0}^{q-1} a_l k^l = 0$, але навіть не можна вказати порядок рівняння. Ця непристосованість звичайної схеми чорної скриньки для вивчення нерегульованого об'єкта за сигналом, що встановився, і призводить до необхідності обліку внутрішніх флуктуацій в рівняннях сигналу об'єкта.

Обмежимося розглядом автономних об'єктів, в динамічні рівняння яких час t у явному вигляді не входить

$$D_0\left[U(t;\mathrm{x});\mathrm{x}\right]=0. \tag{2}$$

Припустимо, що D_0 дійсний диференціальний оператор виду

$$D_0[U;\mathrm{x}]\equiv\frac{d^qU}{dt^q}+a\left(U,\frac{dU}{dt},\ldots,\frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}};\mathrm{x}\right). \tag{3}$$

Змінні $U,\frac{dU}{dt},\ldots,\frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$ при кожному фіксованому значенні параметрів x будемо розглядати як координати зображуючої точки $\mathbf{U}$ об'єкта у фазовому просторі $R_q(\mathrm{x})$ його динамічної системи [2]. Поряд з будь яким розв'язанням $U_0(t;\mathrm{x})$ автономного динамічного рівняння (2) функція $U_0(t;+\tau;\mathrm{x})$ буде також його розв'язанням при будь-якому τ. В просторі $R_q(\mathrm{x})$ сукупність точок $\{U_0(t+\tau;\mathrm{x})\}$ при різних значеннях утворює відповідний цим рішенням єдиний геометричний образ – динамічну траєкторію $\mathbf{U}_0(\mathrm{x})$. Припустимо, що в області $G(\mathrm{x})$ при кожному $\mathbf{x}(x_i\in \mathrm{X}_i, i=1,2,\ldots,Q)$ виконані умови теореми існування і єдиності розв'язання диференціального рівняння (2) так, що через кожну точку $\mathbf{U}$ області $G(\mathrm{x})$ проходить одна і тільки одна динамічна траєкторія. Якщо траєкторія $\mathbf{U}_0(\mathrm{x})$ не вироджується в точку спокою, то в її достатньо малої окрузі $G(\mathbf{U}(\mathrm{x}))$, $G(\mathbf{U}_0(\mathrm{x}))\subseteq G(\mathrm{x})$, в якій однозначно визначені ортогональні проекції точок $\mathbf{U}$ на цю траєкторію, можна ввести фазу $t'(\mathbf{U})$, що зображує точки $\mathbf{U}$, зв'язану з рухом $U_0(t;\mathrm{x})$. За визначенням фаза $t'(\mathbf{U})$ дорівнює значенню t, котре відповідно із законом $U_0(t;\mathrm{x})$ отримує проекція точки $\mathbf{U}$ на траєкторію $\mathbf{U}_0(\mathrm{x})$. Вивчаючи поведінку об'єкта поблизу траєкторії $U_0(t;\mathrm{x})$, що не вироджується в точку, буде у подальшому переходити в сигналі $U(t;\mathrm{x})$ від аргументу t до фази $t'\equiv t'(\mathbf{U}(t;\mathrm{x}))$, зв'язаної з динамічним рухом $U_0(t;\mathrm{x})$. Це дозволить уникнути труднощів, викликаних дифузійним розмиттям рухів автономного об'єкта вздовж динамічної траєкторії, що виникає під дією тангенціальної складової флуктуаційного збурення.

Розглянемо найпростішу ситуацію, коли серед траєкторій $\mathbf{U}_0(\mathrm{x})$ в області $G^+(\mathrm{x})$, що розглядається, фазового простору $G^+(\mathrm{x})\subseteq G(\mathrm{x})$ є єдина асимптотично стійка ω-гранична траєкторія $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$, відстань котрої від будь-якої достатньо близької траєкторії рівняння (2) прагне до нуля зі зростанням фази. Одне із відповідних $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ рухів $\mathbf{U}_0^+(t+\tau_x;\mathrm{x})$ при підходящому виборі τ_x являється динамічною апроксимацією реєстрованого сигналу об'єкта $U(t;\mathrm{x})$, що встановився. Якщо траєкторія $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ не вироджується в точку, в її окрузі $G(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x}))$, $G(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x}))\subseteq G^+(\mathrm{x})$, переходячи від декартових координат $U,\frac{dU}{dt},\ldots,\frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$ до зв'язаних з рухом $\mathbf{U}_0^+(t;\mathrm{x})$ локальним координатам: тангенціальної координаті – фазі $t'(\mathbf{U})$ і ортогональним траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ координатам $n_k=n_k(\mathbf{U})$ $(k=1,2,\ldots,q-1)$, можна на основі динамічного рівняння (2) записати еквівалентну йому систему диференціальних рівнянь

$$\frac{dt}{dt'}+A_0\left(t',n_1,n_2,\ldots,n_{q-1};\mathrm{x}\right)=0; \tag{4}$$

$$\frac{dn_m}{dt'}+A_m\left(t',n_1,n_2,\ldots,n_{q-1};\mathrm{x}\right)=0\ (m=1,2,\ldots,q-1). \tag{5}$$

Припустимо, що функція a у формулі (3) досить, гладка, так що в малій окрузі $G_1(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})), G_1(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x}))\subseteq G(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x}))$, траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ істотне значення мають лише лінійні за ортогональним відхиленням члени розкладання функцій A_0 і A_m у степеневі ряди по $n_k(k=1,2,\ldots,q-1)$; при цьому отримуємо

$$\frac{d\sigma}{dt'}+\sum_{k=1}^{q-1}A_0^{(k)}(t';\mathrm{x})\,n_k=0; \tag{6}$$

$$\frac{dn_m}{dt'}+\sum_{k=1}^{q-1}A_m^{(k)}(t';\mathrm{x})\,n_k=0\ (m=1,2,\ldots,q-1). \tag{7}$$

де $\sigma\equiv t'-t(t';\mathrm{x})$ – набіг фази. Відсутність у рівняннях (6), (7) вільних членів випливає з належності руху $U_0^+(t;\mathrm{x})$ до розв'язків рівняння (2): тотожності $t'\equiv t, n_k\equiv 0(k=1,2,\ldots,q-1)$ повинні задовольняти рівнянню (2), а отже і (6), (7).

З близькими до невироджуваної траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ динамічними рухами пов'язані три різні набори характерних часів. Перший – $\{\Theta_{g_1}(\mathrm{X})\}$ визначається динамічним рухом по траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$; наприклад, при замкнутій для всіх x траєкторії, коли

$$U_0^+(t;\mathrm{x}) \equiv U_0^+(t+T_{\mathrm{x}};\mathrm{x}), \tag{8}$$

до сукупності $\Theta_{g_1}(\mathrm{x})$ можна віднести значення періоду T_{x} та ряду його часток, що відповідає багатству граничного руху обертонами. Другий набір часу $\{\Theta_{g_2}(\mathrm{x})\}$ визначається значеннями $A_0^{(k)}(t';\mathrm{x})$ і характеризує неізохронності динамічних рухів поблизу $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$. Третій набір $\{\Theta_{g_3}(\mathrm{x})\}$ описує повернення динамічної системи, відхиленої по-різному в окрузі $G(\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x}))$ від граничної траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$, назад до цієї траєкторії після припинення обурення. Останню сукупність $\{\Theta_g(\mathrm{x})\}$ складає набір часів релаксації динамічної системи поблизу Ε -граничної траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$.

Позначимо

$$\Theta_m(\mathrm{x}) \equiv \min_g\{\Theta_g(\mathrm{x})\}, \Theta_M(\mathrm{x}) \equiv \max_g\{\Theta_g(\mathrm{x})\}.$$

Якщо $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ – точка спокою рівняння (2), то немає потреби переходити від $U, \frac{dU}{dt}, \ldots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$ до нових координат; лінеаризація динамічного рівняння проводиться безпосередньо по $U - U^+, \frac{dU}{dt}, \ldots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$.

В цьому випадку всі q характеристичних часів є часом релаксації динамічної системи навколо стану асимптотично стійкої рівноваги.

Згідно з вище приведеним, виходитимемо з апроксимації спостережуваного сигналу $U(t;x)$ рівнянням

$$D_0\left[U(t;x)\right] = F(t;x), \tag{9}$$

в якому $F(t;x)$, при кожному значенні x є стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням [3]: $F(t;x) \equiv 0$. У всіх фізичних прикладах (коли джерелом флуктуацій спостережуваного сигналу є: тепловий шум у термодинамічно рівноважній системі, дробовий ефект у потоці частинок, шум, що викликається спонтанними переходами в квантовомеханічній системі), аналізованих з точки зору структури сил, що обурюють відповідну динамічну систему, функцію $F(t;x)$ можна вважати ‹ -корельованими гаусовими флуктуаціями: $F(t;x)F(t+\tau;x) \equiv C(t;x)\delta(\tau)$. Природно очікувати, що таке становище, у якому зміни сигналу $U(t;x)$ у часі формуються взаємозалежними рухами великої кількості однотипних мікрочастин об'єкта, здійснюється у задачах, наприклад, економіки. Виходячи зі сказаного і не зупиняючись на додаткових уточнюючих та обґрунтовуючих міркуваннях, приймемо як постулат, що значення флуктуаційного обурення повністю втрачають стохастичний зв'язок при часових зрушеннях $|\tau| \geqslant \tau_0$, причому величина мінімального значення τ_0, що характеризує тривалість стохастичного зв'язку флуктуаційного збурення, істотно менше від мінімального часу релаксації $\Theta_m(\mathrm{x})$ динамічної системи (2). Надалі, вважаючи $F(t;x)$ гаусовим випадковим процесом, виходитимемо зі співвідношень

$$F(t;x)F(t+\tau;x) = 0 \text{ при } |t|,|t+\tau| \le \frac{\Theta}{2},\ |\tau| \geqslant \tau_0,\ \tau_0 \ll \Theta_m(\mathrm{x}). \tag{10}$$

Незважаючи на наявність у рівнянні (9) флуктуаційного обурення, що вводить час у явному вигляді, продовжуватимемо характеризувати стан об'єкта, що спостерігається, величинами $\mathbf{U} \equiv \left(U, \frac{dU}{dt}, \ldots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}\right)$ і описувати зміни сигналу в часі положеннями зображуючої точки $U(t;x)$ у фазовому просторі $R_q(\mathrm{x})$ незбурненої динамічної системи. Допустивши, що зміни сигналу, що спостерігаються, непогано апроксимуються динамічним рівнянням (2), припускаємо, що інтенсивність відгуку відповідної динамічної системи на флуктуаційне обурення $F(t;x)$ досить мала. Згідно з цим будемо вважати, що внутрішні флуктуації не виводять сигнал з округу асимптотично стійкої Ε -граничної траєкторії динамічної системи [4]. При невиродженості траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ маємо

$$\frac{dt}{dt'} + A_0(t', n_1, n_2, \ldots, n_{q-1}; x) = F_0(t'; x), \tag{11}$$

$$\frac{dn_m}{dt'} + A_m(t', n_1, n_2, \ldots, n_{q-1}; x) = F_m(t'; x) \quad (m = 1, 2, \ldots, q-1). \tag{12}$$

де $F_0(t';x)$ і $\{F_m(t';x)\}$ – перераховані до нового аргументу t' складові флуктуаційного обурення вздовж траєкторії $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ та за різними $(m = 1, 2, \ldots, q-1)$ ортогональним $\mathbf{U}_0^+(\mathrm{x})$ напрямків $F_m(t';x) \equiv 0, (m = 1, 2, \ldots, q-1)$. Стохастичний зв'язок між зрушеними в часі значеннями цих складових зникає при зрушеннях $|\tau| \geqslant \tau_0$.

Якщо флуктуації настільки малі, що зображуюча точка об'єкта протягом інтервалу спостереження сигналу $\left(-\Theta / 2, \Theta / 2\right)$ практично не виходить за межі округи $G_1\left(\mathbf{U}_0\left(\mathrm{x}\right)\right)$, то рівняння сигналу набувають вигляду

$$\frac{d\sigma}{dt'} + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}\left(t';x\right) n_k = F_0\left(t';x\right); \tag{13}$$

$$\frac{dn_m}{dt'} + \sum_{k=1}^{q-1} A_m^{(k)}\left(t';x\right) n_k = F_m\left(t';x\right) \quad \left(m = 1, 2, \ldots, q-1\right). \tag{14}$$

У цій ситуації задача аналізу динамічної структури об'єкта при кожному значенні x після розрахунку положення Ė -граничної динамічної траєкторії $\mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)$ у фазовому просторі $R_q\left(\mathrm{x}\right)$ зводиться до оцінки чисельних значень коефіцієнтів $A_0^{(k)}, A_m^{(k)}\left(k, m = 1, 2, \ldots, q-1\right)$.

Вже наявність граничної траєкторії, що не вироджується в точку спокою, свідчить про нелінійність динамічної системи (2). Тому лінеаризація рівнянь (4) – (7) біля невиродженої $\mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)$ не зводить динамічний опис до лінійного, але спрощує та обмежує його. Однак якщо внутрішні флуктуації настільки малі, що нелінійні за відхиленнями від траєкторії $\mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)$ ефекти надійно не виявляються, то в загальному випадку докладніші відомості про оператора $D_0\left[U;x\right]$ сигнал не несе. Тільки коли апріорні відомості виділяють досить вузький клас операторів $\left\{D_\alpha\right\}$, запис сигналу, що не виходить протягом інтервалу $\left(-\tilde{\ } / 2, \tilde{\ } / 2\right)$ за межі округу $G_1\left(\mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)\right)$, дозволяє виявити динамічну структуру об'єкта з усіма необхідними деталями [5].

Для руху в окрузі ізольованої асимптотично стійкої точки спокою $U = \mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)$ динамічної системи (2) під дією флуктуаційного обурення відповідно до формул (2), (3), (9) запишемо

$$\frac{d^q U}{dt^q} + a\left(U, \frac{dU}{dt}, \ldots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}; \mathrm{x}\right) = F\left(t;x\right) \tag{15}$$

Якщо внутрішні флуктуації практично не виводять зображуючу точку об'єкта за межі округи $G_1\left(\mathbf{U}_0^+\left(\mathrm{x}\right)\right)$, де у функції a суттєві лише лінійні члени розкладання в степеневий ряд за відхиленнями $U - U^+, \frac{dU}{dt}, \ldots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$ від точки спокою, рівняння сигналу приймає вид

$$\frac{d^q U}{dt^q} + a_0\left(\mathrm{x}\right)\left[U - U_0^+\left(\mathrm{x}\right)\right] + \sum_{k=0}^{q-1} a_k\left(\mathrm{x}\right)\frac{d^k U}{dt^k} = F\left(t;x\right) \tag{16}$$

Висновки

У роботі було сформульовано і певною мірою обґрунтовано загальний і досить простий принцип опису сигналу. Згідно з цим основним положенням властивості сигналу, які є кількісно суттєвими і регулярно проявляються за даних умов спостереження, зв'язуються між собою деякою динамічною структурою об'єкта. Роль менш істотних за цих умов рухів об'єкта, так само як і роль зовнішнього середовища, відображає в цьому описі сила $F\left(t\right)$, що обурює динамічну систему, яка флуктує в часі. Дослідження статистичних властивостей відгуку динамічної системи на флуктуаційне обурення $F\left(t\right)$ дозволяє в досить широкому колі задач оцінювати за сигналом, що встановився, динамічні характеристики нерегульованого об'єкта.

Список використаної літератури

1. Димова Г.О. Методи і моделі упорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів: монографія / Ганна Олегівна Димова. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2020. 176 с.

2. Гудзенко Л.И. Некоторые вопросы структуры объекта по установившемуся сигналу. *Труды физического института имени П.Н. Лебедева*, Т.45. 1969, С. 110–133.

3. Димова Г.О., Димов В.С. Генерування випадкових процесів динамічними системами. *Прикладні питання математичного моделювання*. Том 1 № 2. Херсон, 2018. С. 55–64. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-55-64.

4. Тихонов А. Н., Гончаровский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.

5. Димова Г.О., Димов В.С. Проекційні методи дослідження обернених задач лінійних динамічних систем. *Прикладні питання математичного моделювання.* Том 2 № 1. Херсон, 2019. С. 182–188. DOI: 10.32782/2618-0340-2019-3-17.

References

1. Dymova H.O. Metody i modeli uporyadkuvannya eksperymental'noyi informatsiyi dlya identyfikatsiyi i prohnozuvannya stanu bezperervnykh protsesiv: monohrafiya [Methods and models for ordering experimental information

for identifying and predicting the state of continuous processes] Kherson: Publishing house FOP Vyshemyrskyy V.S., 2020. 176 p.

2. Gudzenko, L. I. Nekotoryye voprosy struktury ob"yekta po ustanovivshemusya signalu [Some questions of the structure of the object on the basis of a steady signal]. *Proceedings of the Physical Institute named after P. N. Lebedeva*, 45. 1969, 110–133.

3. Dymova H.O., Dymov V.S. Heneruvannya vypadkovykh protsesiv dynamichnymy systemamy [Generation of random processes by dynamic systems]. *Applied problems of mathematical modeling*. Volume 1 No. 2. Kherson, 2018. Pp. 55–64. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-55-64.

4. Tikhonov A. N., Goncharovskiy A. V., Stepanov V. V., Yagola A. G. Regulyariziruyushchiye algoritmy i apriornaya informatsiya [Regularizing algorithms and a priori information]. M.: Nauka, 1983. 200 p.

5. Dymova H.O., Dymov V.S. Proektsiyni metody doslidzhennya obernenykh zadach liniynykh dynamichnykh system [Projection methods of studying inverse problems of linear dynamic systems]. *Applied problems of mathematical modeling*. Volume 2 No. 1. Kherson, 2019. Pp. 182 – 188. DOI: 10.32782/2618-0340-2019-3-17.