

Академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

ЧУГАЄВ Володимир Іванович

**МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ВПЛИВІВ
НА РОЗПОДІЛЕНУ ДИССИПАТИВНУ СИСТЕМУ**

05.13.16 — застосування обчислювальної техніки, математичного моделювання та математичних методів у наукових дослідженнях

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1993



00802958 (W)

Робота виконана в Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова АН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор ОНОПЧУК Юрій Миколайович.

Науковий консультант: академік АН України
СЕРГІЄНКО Іван Васильович.

Офіційні опоненти:

1. Доктор фізико-математичних наук, професор
СКОПЕЦЬКИЙ Василь Васильович,

2. Доктор біологічних наук, кандидат технічних наук
МІСЮРА Анатолій Григорович.

Провідна організація: Київський університет ім. Т. Г. Шевченка.

Захист відбудеться «———» ————— 199 р. о———
год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.45.01
при Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова АН Украї-
ни за адресою:

252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному
архіві інституту.

Автореферат розісланий «———» ————— 199 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

СИНЯВСЬКИЙ В. Ф.

В-28.857

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Моделювання процесів, які лежать в основі керування живими, хімічними, біохімічними та іншими синергетичними системами, а також вивчення процесів керування утворенням та функціонуванням когерентних структур із заданими властивостями, веде до розуміння формування когерентної (кооперативної) поведінки відкритих нелінійних дисипативних систем як єдиного цілого.

Динамічні процеси в цих системах описуються нелінійними рівняннями у часткових похідних. Дослідження зазначених систем, за відсутністю загальних аналітичних методів проводиться за допомогою спільного застосування обчислювальної техніки, математичних методів та математичного моделювання.

Об'єктом дослідження обрана модель системи "брюсселятор". Це розподілена хімічно-реагуюча система з автокаталізом, дисипацією та зовнішньою підкачкою речовини (модель цієї системи було отримано співробітниками на чолі з І.Р. Пригожиним). Еволюція компонент моделі описується системою нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних параболічного типу з дифузією. При дослідженні цієї моделі були отримані деякі режими функціонування (дисипативні структури), які виникають у системі за точкою біфуркації. Однак дослідження поведінки системи під дією зовнішніх впливів не проводилося.

Проблема дослідження фінітного керування режимами функціонування параболічних систем за допомогою зовнішніх локальних впливів раніше не розглядалася. У роботі, що виконана в рамках НДР "Розробка та дослідження математичних моделей функціонально організованих систем та керування ними стосовно об'єктів біологічної та технічної природи" Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова АН України (номер державної реєстрації 01.9.00054292) та в рамках тематики тимчасового наукового колективу "Отклик", створеного спільною постановою Ради Міністрів, Державного Комітету з науки і техніки та Академії наук СРСР (постанова N 278/141 від 01.07.86р.), уперше розглянута проблема фінітного керування за допомогою зовнішніх локальних впливів.

МЕТА РОБОТИ

дослідити стійкість, керованість та методи адаптації нелінійної розподіленої дисипативної системи при зовнішніх локальних змінах коефіцієнтів дифузії.

ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

1. Розробити програмне забезпечення для розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних другого ступеня з дифузією.

2. На основі базової кінетичної моделі (модель "брюсселятор") одержати просторові та просторово-часові структури.

3. У сімействі квазігармонічних дисипативних структур (при тих самих значеннях параметрів) визначити точки просторової локалізації, що здатні приймати зовнішній вплив.

4. Дослідити реакції компонент нелінійної розподіленої дисипативної системи на просторову еволюцію дисипативних структур за короткочасної локальної зміни коефіцієнтів дифузії.

5. Дослідити сталість просторових дисипативних структур та можливість переключення режиму функціонування розподіленої дисипативної системи за локальних змін коефіцієнтів дифузії.

6. Дослідити можливість регулювання режиму функціонування розподіленої дисипативної системи за допомогою локальної зміни коефіцієнтів дифузії.

НАУКОВА НОВИЗНА. Для нелінійних розподілених дисипативних систем типу "брюсселятор" установлені:

режим функціонування (просторова дисипативна структура), який характеризується просторовим розподіленням з трьома (або кратними трьома) максимумами автокаталітичної змінної і особливою стійкістю відносно зовнішніх локальних впливів, які не переключають систему в інший режим функціонування. Отримано початкові умови для такої дисипативної структури;

межі просторового континууму стійких станів систем, що самоорганізуються;

режим періодичних просторово-часових коливань солітонного типу в негамільтоновій системі;

точки дисипативної структури, що здатні сприймати зовнішній локальний вплив.

Сформульована та науково обгрунтована гіпотеза механізму зовнішніх локальних впливів, які приводять до зменшення коефіцієнта дифузії автокаталітичної змінної у точці впливу. Досліджено вплив на різноманітні просторові точки дисипативних структур і різні реагуючі речовини та знайдено компонент, що може приймати цей вплив.

За допомогою зовнішніх локальних впливів досліджена можливість: а) переключення режиму функціонування, його динаміка; б) керування переключенням режимів функціонування; в) регулювання режимів функціонування без переключення.

НАУКОВА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ. Дослідження хімічних просторово-часових структур дає можливість глибше зрозуміти природу процесу упорядкування в нерівноважних системах, що дає змогу передбачати характер поведінки системи залежно від зміни параметрів. Результатами дисертацій-

ної праці можна скористатися при аналізі біомедичних експериментів по вивченню впливу зовнішніх полів та випромінювань на живі організми.

АПРОВАЦІЯ ПРАЦІ. Результати дисертаційної праці доповідались та обговорювались на:

1. VII Annual EMLG Conference "Statistical mechanics of chemically reacting liquids" (Novosibirsk, USSR, 1989).

2. I Всесоюзному симпозіумі з міжнародною участю "Фундаментальные и прикладные аспекты применения мм электромагнитного излучения в медицине" (Київ, 1989).

3. Всесоюзній конференції "Применение компьютеров в совершенствовании обучения в медицине" (Київ, 1989).

4. Nonlinear World. Proceedings of the IV International Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics (Kiev, 1989).

5. Першій республіканській конференції "Новые физические методы в медицине" (Ворошиловград, 1990).

ПУБЛІКАЦІЇ: Основні результати дисертації викладені в 11 працях; перелік основних наведено в кінці автореферату.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЩО ЗАХИЩАЮТЬСЯ

У нелінійній розподіленій дисипативній системі типу "брюсселятор":

існують межі просторового континууму сталих режимів функціонування, серед яких за заданих початкових умов виникає режим функціонування системи, який характеризується просторовим розподіленням з трьома (та кратними трьома) максимумами автокаталітичної змінної і є стійким щодо зовнішніх локальних впливів;

за заданих початкових умов та значень параметрів, які визначають межі зон тяжіння сталих режимів функціонування (сепаратриси), виникає режим періодичних просторово-часових коливань солітонного типу;

є точки, що здатні приймати зовнішній локальний вплив, за допомогою якого можливе переключення, регулювання та керування сталими режимами функціонування системи.

СТРУКТУРА І ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ. Дисертація складається з вступу, трьох глав, заключення та списку літератури. Обсяг дисертації 115 сторінок, 48 рисунків, 3 таблиці, бібліографічний покажчик з 123 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ: Подана праця складається з вступу; літературного огляду понять і методів, які використовуються при аналізі функціонально-енергетичних зв'язків упорядкованих когерентних структур;

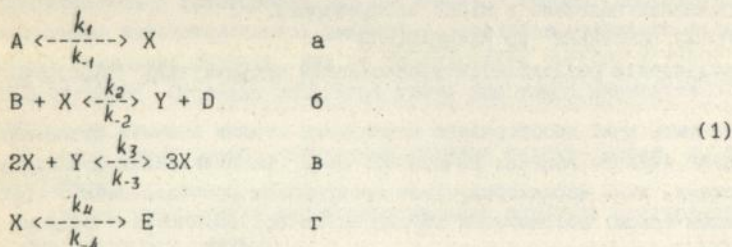
досліджень, розглянутих у двох главах; висновків та списку використаної літератури.

У вступі описано актуальність, завдання дослідження, наукову новизну, та практичну цінність, основні положення, що захищаються.

У літературному огляді понять та методів наводяться приклади когерентних упорядкованих структур (хімічні, фронти фазових перетворень та виникнення структур у твердих тілах, гідродинамічні, біологічні). Дається невеликий огляд понять та методів аналізу коливальних перехідних процесів у нелінійних динамічних системах (фазовий портрет та поняття сталості, нелінійність, нестійкість і бифуркації тощо). Описані деякі методи теорії збурення.

У другому розділі на прикладі моделі "брксселлятор" виконується математичне моделювання когерентних просторових та просторово-часових дисипативних структур.

Динамічна система "брксселлятор" виникає при описанні нижченаведеної схеми хімічних реакцій на основі закону діючих мас:



де А, В, D, E, X, Y - символи реагуючих речовин; k_1, k_2, \dots, k_4 - константи швидкості реакцій.

Схема (1) описує хімічний процес з автокаталізом речовини X (реакція 1, в). Нерівноважні умови створюються за рахунок негайного виведення продуктів реакції D та E, що означає $k_2 \approx 0, k_4 \approx 0$ (у вихідній схемі вважаємо також $k_{-1} = k_{-3} = 0$, що пов'язано з незворотністю стадій реакцій). Концентрації речовин А і В підтримуються постійними. Отже, в системі залишаються дві еволюційні концентрації - речовини X і Y; система дифузійно-кінетичних рівнянь, яка описує еволюцію X і Y, у приведеній формі має вигляд

$$\begin{aligned}
 \partial X / \partial t &= A - (B+1)X + X^2 Y + D_x \cdot \nabla^2 X, \\
 \partial Y / \partial t &= BX - X^2 Y + D_y \cdot \nabla^2 Y
 \end{aligned} \quad (2)$$

Далі розглядається одномірний варіант системи (2), де $\nabla^2 = \partial^2 / \partial r^2$, $r = \tilde{r} / L$ на відрізку $0 \leq r \leq 1$, який поділяється на 101 точку, з граничними умовами другого роду:

$$(\partial X / \partial r)_{r=0,1} = (\partial Y / \partial r)_{r=0,1} = 0. \quad (3)$$

Як початкові умови застосуємо стаціонарні однорідні рішення з малою флуктуацією по X :

$$X_S = A; \quad Y_S = B / A. \quad (4)$$

Рішення (4) дає "термодинамічну вітку" станів системи, сталої біля термодинамічної рівноваги. Коли управляючі параметри досягають своїх критичних (біфуркаційних) значень, "термодинамічна вітка" втрачає стійкість. У системі можуть виникати просторово-часові структури.

Аналіз сталості в лінійному наближенні рішень (X_S, Y_S) відносно однорідних збурень (флуктуацій) $\delta^j X(t)$, $\delta^j Y(t)$ дає змогу одержати критерій виникнення часових осциляцій (біфуркація Хопфа)

$$B > B_c = 1 + A^2. \quad (5)$$

аналіз стійкості в лінійному наближенні рішень (X_S, Y_S) стосовно неоднорідних збурень $\delta^j X(r,t)$, $\delta^j Y(r,t)$ дозволяє записати умови утворення стаціонарних структур (біфуркація Тьюрінга)

$$B > B_c = (1 + \sqrt{D_X / D_Y} \cdot A)^2. \quad (6)$$

Щоб знайти чисельні рішення системи (2), застосували неявний метод (метод Кранка - Ніколсона):

$$\begin{aligned} X_m^{n+1} - X_m^n / T &= F(X_m^n, Y_m^n) + (X_{m+1}^{n+1} - 2X_m^{n+1} + \\ &+ X_{m-1}^{n+1}) \cdot D_X / h^2, \\ Y_m^{n+1} - Y_m^n / T &= G(X_m^n, Y_m^n) + (Y_{m+1}^{n+1} - 2Y_m^{n+1} + \\ &+ Y_{m-1}^{n+1}) \cdot D_Y / h^2. \end{aligned} \quad (7)$$

де F и G - нелінійні функції відповідних крайових задач; T - крок у часі; h - крок у просторі; n - індекс відповідної часової змінної; m - індекс відповідної просторової змінної; крайові умови задавалися таким чином:

$$X_0^n = X_1^n; \quad Y_0^n = Y_1^n; \quad X_{m-1}^n = X_m^n; \quad Y_{m-1}^n = Y_m^n.$$

початкові:

$$X_m^0 = X_m; \quad Y_m^0 = Y_m; \quad (m = \overline{0, M}).$$

Збіжність обчислювальної схеми (7) за певних початкових та крайових умов контролювалась шляхом обчислення відхилень $L1$ і $L2$ векторів $X^n = \{ X_m^n \}_{m=0}^n$ від якогось фіксованого вектора $X^0 = \{ X_m^0 \}_{m=0}^n$, яким звичайно вибирався вектор значень однорідного стаціонарного рішення або вектор, координати якого дорівнювали значенням дисипативної структури (ДС), еволюція якої вивчалась у даному чисельному експерименті. При цьому

$$L1 = \max | X_m^n - X_m^0 |$$

$$L2 = \sqrt{1/n \cdot \sum_m (X_m^n - X_m^0)^2}$$

Обчислювальний процес зупинявся, коли $L1$ і $L2$ як функції n переставали змінюватися в необхідній кількості розрядів. Це число визначається величиною характерної зміни $L1$ і $L2$ за один крок у часі та кількістю кроків, необхідних для встановлення факту належності цього значення X аттрактору тої чи іншої ДС. Дані критерії залежать від T і h і утворюються евристично в процесі чисельного експерименту.

Суто неявна різницева схема для нелінійного рівняння теплопровідності абсолютно стала, тобто стала за будь-якого співвідношення між T і h . У розглядуваному випадку, зважаючи на наявність нелінійних джерел, які описуються функціями F і G , схема (7) вже не є цілком стійкою і прийнятне співвідношення між T і h визначається чисельним експериментом залежно від значень керуючих параметрів. Вочевидь, особливість такого вибору полягає в тому, що чим ближче значення керуючих параметрів до біфуркаційних, тим меншим повинен бути крок у часі T при фіксованому значенні h .

Як відомо, при фіксованих значеннях керуючих параметрів системи (2) може відповідати не одне, а ціла низка дисипативних структур (сукупність якісно подібних структур, що виникають за умов втрати стійкості "термодинамічної вітки" за одних і тих же значень керуючих параметрів, які відрізняються просторовим періодом). Дисипативні структури з параметрами $A=2$, $B=10$, $D_x=16 \cdot 10^{-4}$, $D_y=8 \cdot 10^{-3}$ є рішеннями чисельного експерименту. Структура з трьома максимумами автокаталітичної змінної одержана вперше. Кожній із просторових структур визначено початкові умови. Наприклад, просторовій структурі з трьома максимумами відповідають флуктуації початкових умов у точках 18, 51, 87.

Змінюючи параметри і коефіцієнти дифузії, можна одержати просторові дисипативні структури із різною амплітудою концентрацій та з різним числом екстремумів.

При чисельному рішенні крайової задачі (2)-(4) з параметрами $A=2$,

$D_x=16 \cdot 10^{-4}$, $D_y=8 \cdot 10^{-3}$ використовувалися різні значення керуючого параметра з області $B \gg B_c$.

Дослідження з чисельного моделювання показують, що при $B > B$ виникає просторове розподілення концентрацій у системі, обмеженій "знизу" і "зверху" розподіленням з трьома максимумами та шістьма максимумами автокаталітичної змінної.

Якщо змінити коефіцієнти дифузії (наприклад, $D_x=6 \cdot 10^{-4}$, $D_y=3 \cdot 10^{-3}$), то матимемо область просторових дисипативних структур з такими межами: $6 \leq DC < 9$. При $D_x=4 \cdot 10^{-4}$, $D_y=2 \cdot 10^{-3}$ одержимо $9 \leq DC < 12$.

Показано дисипативні структури, які є рішенням різних значень керуючих параметрів.

Показано сімейство контрастних дисипативних структур (страти).

При чисельному рішенні крайової задачі (2)-(4) з параметрами $A=2$, $B=10$, $D_x=2 \cdot 10^{-3}$, $D_y=8 \cdot 10^{-3}$ одержано режим періодичних просторово-часових коливань солітонного типу (рис.1).

Даний режим виникає на межі області існування аттрактора (область тяжіння просторової дисипативної структури) ідентифікує сепаратрису при переході системи з одного режиму функціонування в другий за однакових значень параметрів системи.

Зазначимо, що аналіз стійкості в лінійному наближенні стаціонарних однорідних рішень системи (4) не дає умов для появи такого режиму.

В третій главі досліджується стійкість просторових дисипативних структур за наявності зовнішніх локальних впливів на коефіцієнти дифузії.

Керуючий вплив безпосередньо торкається основних рівнянь об'єкту і є локальною зміною поля коефіцієнтів дифузії хімічно реагуючої системи.

Неявні методи чисельного рішення систем (крайових задач) нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних параболічного типу з дифузією застосовуються як математичний апарат дослідження.

Дану задачу керування можна віднести до фінітної проблеми, тому що досліджується проблема переведення системи з одного стану в інший за кінцевий (фінітний) час.

Дослідження стійкості та режимів переключення проводилось на просторових структурах з параметрами $A=2$, $B=10$, $D_x=16 \cdot 10^{-4}$, $D_y=8 \cdot 10^{-3}$.

Точками просторової дисипативної структури, які здатні сприймати зовнішній вплив, є точки максимуму і перегину автокаталітичної змінної. Вплив на точки просторової локалізації інших компонентів сис-

теми, які беруть участь у реакції, не змінює області тяжіння даних просторових структур.

Вплив на точку першого максимуму структури з чотирма максимумами величиною $D_x=0$ збуджує в системі періодичні просторово-часові коливання. За певний час впливу відбувається переключення в структуру з трьома максимумами. При впливі на точку другого максимуму величиною $D_x=0$ в системі також збуджуються періодичні просторово-часові коливання. Переключення відбувається до структури з трьома максимумами. Впливаючи на решту максимумів або на точки згину, відбуваються ті самі ефекти. Динаміку переключення показано на рис. 2 (τ - мінімальний час впливу, необхідний для переключення).

При впливі $D_x=0$ на точку першого максимуму структури з п'ятьма максимумами автокаталітичної змінної відбувається переключення в структуру з чотирма максимумами. Вплив $D_x=0$ на інші максимуми і точки згину в цій структурі приводить до переключення в ту саму структуру. Одночасний вплив $D_x=0$ на декілька максимумів структури робить переключення в структуру з трьома максимумами (рис. 3).

У вищезгаданих випадках вплив $D_x=0$ на точку зачіпає й інші точки структури, збуджуючи в системі просторово-часові коливання.

Якщо впливати на точки структур по параметру D_y , то переключення не відбувається ні за якого впливу. Якщо впливати на максимуми структур одночасно параметрами D_x і D_y , то час, потрібний для переключення, не змінюється.

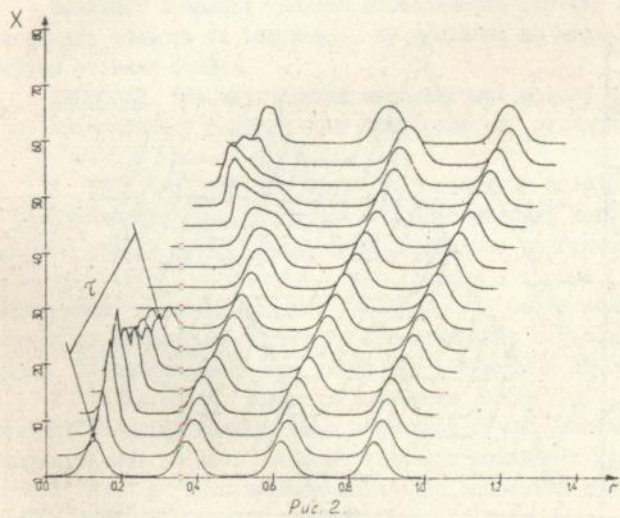
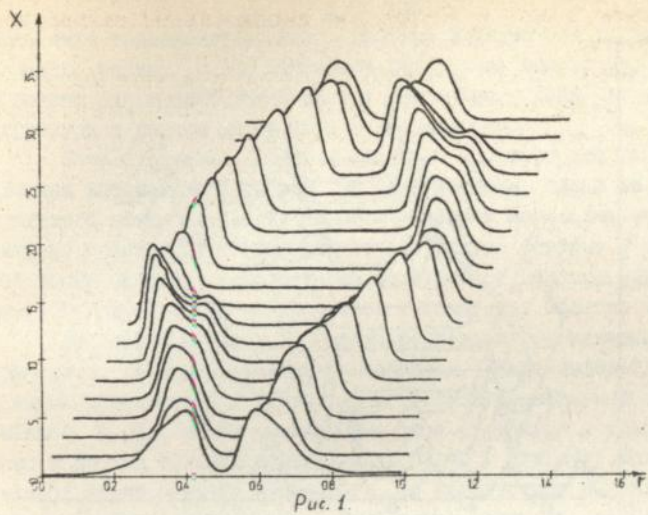
Збільшення коефіцієнту дифузії в точці впливу не приводить до переключення режиму функціонування системи.

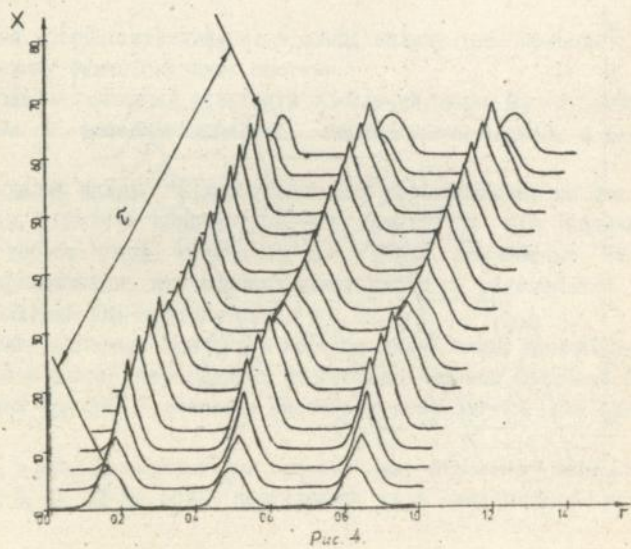
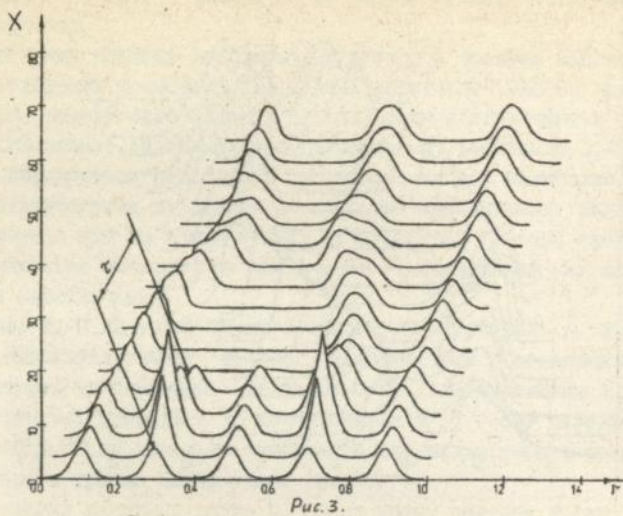
У вищезгаданих випадках зовнішній локальний вплив $D_x=0$ змінює область тяжіння у фазовому просторі, переключаючи систему з одного стану в інший.

Вільш тривалий вплив, ніж потрібно для переключення, не дає додаткових ефектів. Система адаптується до впливу, в ній виникають періодичні просторово-часові коливання, але після припинення впливу відбуваються переключення, які описані вище, тобто є мінімальний час впливу, що необхідний для переключення.

У зазначених випадках критерієм переключення режиму функціонування системи є поява режиму періодичних просторово-часових коливань. Збудження періодичних часових коливань у системі є недостатнім для переключення.

Структура з трьома максимумами має особливу стійкість щодо локального впливу $D_x=0$. Її не можна переключити ні в який інший стан при





будь-якій тривалості впливу. Система адаптується до зовнішнього локального впливу. В ній виникають періодичні часові коливання. На рис. 4 показано одночасний вплив на всі максимуми. Таку ж стійкість мають структури з числом максимумів кратним трьом.

Хоча структура розвитку фазового простору для нелінійних розподілених дисипативних систем ще не з'ясована, однак на підставі вищезгаданого можна твердити, що при зовнішніх локальних впливах $D_x=0$ виявляються гомоклінічні траєкторії, які ведуть систему в область особливої точки фазового простору, що називається центром. Однак після зняття цього впливу система повертається в початкову область тяжіння.

Локально змінюючи D_x , можна не тільки переключати структуру, а й управляти її переключенням. Наприклад, якщо впливати на структуру з п'ятьма максимумами в першому і в третьому максимумах автокаталітичної змінної $D_x=0$, то ми переключимо її в структуру з трьома максимумами. Якщо ж до цих впливів додати вплив $D_x=0$ у мінімумі автокаталітичної змінної після першого максимуму, то відбудеться переключення в структуру з чотирма максимумами. Комбінуючи вплив на різні точки, маємо різноманітні варіанти керування режимами функціонування системи.

Впливаючи на структуру через коефіцієнти дифузії менше ніж потрібно для переключення, можна регулювати амплітуду максимумів структури без її переключення.

Зовнішні локальні впливи переключають систему лише в стани, які становлять область її існування, не виходячи за межі просторового континууму стійких станів.

ВИСНОВКИ. При дослідженні математичної моделі нелінійної розподіленої дисипативної системи типу "брюсселятор" отримані такі результати:

1. Виявлені межі просторового континууму стійких станів системи, що самоорганізується. Серед них отримано стійкий щодо зовнішнього локального впливу режим функціонування хімічно реагуючої системи, який характеризується просторовим розподіленням з трьома (та кратними трьом) максимумами автокаталітичної змінної. У цьому режимі система адаптується до локального впливу (в ній виникають періодичні часові коливання). Визначено початкові умови для виникнення цього режиму.

2. Локалізовані точки дисипативних структур, які реагують на зовнішні локальні впливи. Ними виявились точки максимуму і перегину автокаталітичної змінної системи; виявлено компонент хімічно реагуючої системи, який активно приймає зовнішній локальний вплив. Це коефіцієнт дифузії автокаталітичної змінної.

3. Установлена можливість переключення, керування переключенням і регулювання без переключення режимами функціонування системи, що самоорганізується, при зменшенні коефіцієнта дифузії автокаталітичної змінної у точці, яка сприймає зовнішній вплив. Розглянута динаміка еволюції системи при зовнішньому локальному впливі на коефіцієнти дифузії та встановлено мінімальний час впливу і критерій, який необхідний для переключення режиму функціонування системи. Критерій переключення являє собою виникнення в системі режиму періодичних просторово-часових коливань солітонного типу при зовнішніх локальних впливах на систему. Цей режим знайдено на межі областей тяжіння стійких функціональних станів.

Основні положення дисертації опубліковані в таких працях:

1. Чугаев В. И. Устойчивость пространственных структур в системах с химическими реакциями//Физические принципы диагностики и терапии с помощью ЭМП мм - диапазона; Киев, 1989. -С. 63-64.

2. Моделирование внешнего воздействия на распределенную диссипативную систему/Березецкая Н. М., Каневский В. А., Нежинский И. В., Сериков А. А., Чугаев В. И. -Киев, 1989. -28с. -(Препр./АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-89-12р).

3. Chalyi A. V., Chugaev V. I. External local influence on chemically reacting system//VII Ann. EMLG Conf. "Statistical mechanics of chemically reacting liquids". -Novosibirsk (USSR), 1989. -P. 86.

4. Chalyi A. V., Chugaev V. I., Sysoev V. M. Self - organization models based on the phase transition theory//Conf. "Nonlinear World". -Kiev, 1989. - PP. 73-76.

5. Чугаев В. И. Переключение режимов функционирования химически реагирующей системы при внешнем локальном воздействии//Новые физические методы в медицине. -Ворошиловград, 1990. -С. 59-60.

6. Чугаев В. И. Локальные воздействия на химически реагирующую систему//Биофизика. -1991. -36, вып. 1. -С. 162-165.

Підп. до друку 15.11.93. Формат 60×84/16. Папір друк. №2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,70. Ум. фарбо-відб. 0,82. Обл.-вид. арк. 0,75. Тираж 100.
Зам. 1582.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40

161525

AB 28.837