

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

МОХАММАД РАКАН АБЕД АЛНАБІ АЛЬДЖААФРЕХ

Підпис

УДК 519.876.5:504.05

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ З ДИНАМІЧНИМ
ЗАХИСТОМ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Наумейко Ігор Володимирович,
доцент кафедри прикладної математики,
Харківський національний університет радіоелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Данилов Валерій Якович,
професор кафедри математичних методів системного
аналізу, Навчальний-науковий комплекс «Інститут
прикладного системного аналізу» НТУУ «Київський
політехнічний інститут»;

доктор технічних наук, професор
Заяць Василь Михайлович,
професор кафедри обчислювальної техніки,
Національний університет водного господарства та
природокористування (м. Рівне).

Захист відбудеться « 19 » _____ 06 _____ 2018 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий « 16 » _____ 05 _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Підпис

Л. В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На поточний час в багатьох країнах світу, зокрема, в Україні, зношеність потенційно небезпечних технічних систем (заводи, електростанції та ін.) в середньому перевищує 70%, що робить особливо актуальним математичне моделювання роботи систем безпеки і відновлення працездатності таких систем при техногенних та природних аваріях і катастрофах. Такі ергатичні, тобто людино-машинні системи (ЛМС), що мають також і підсистему «зовнішнє середовище», які включають як катастрофічні і шкідливі природні впливи середовища, так і техногенні шкідливі фактори, прийнято називати системами «Людина-Машина-Середовище» (система Л-М-С) із захистом. За останні роки системи Л-М-С виділилися в особливий клас, що включає деякі важливі системи техніки, економіки, екології, військової справи і безпечної життєдіяльності.

Протиріччя між ефективністю (продуктивністю) і безпекою таких систем породжує науково-технічну проблему, яка може бути вирішена тільки в рамках більш загальної – надсистеми, що включає економічні та соціальні критерії.

Таким чином, побудова математичних моделей, які описують системи з захистом і процеси, що в них відбуваються, була завжди, і на цей час є актуальною проблемою. Значну роль в дослідженнях цієї області мають роботи вітчизняних та зарубіжних авторів: С.П. Капіци, Л.І. Маневича, С. Демберела, Н.К. Юркова та ін.

Динамічні системи з захистом від шкідливих природних чи техногенних факторів включають велику кількість процесів з різним характерним часом, причому ієрархія цих часів така, що вони подекуди розрізняються на багато порядків. При цьому величина характерного часу або відношення часів різношвидкісних процесів відіграє роль малого параметра і дозволяє застосувати асимптотичні методи моделювання таких систем.

У роботі розглядаються тільки системи з зосередженими (точковими) джерелами шкідливих факторів і захист, що діє безпосередньо на ці джерела. Тобто джерела виникнення шкідливих факторів: пожежі, хімічного забруднення, вибуху, але не процеси поширення таких шкідливих факторів в просторі. Ліквідація аварії проводиться технічною підсистемою також точково (гасіння вогнищ, купірування джерел шкідливості, зустрічний вибух – гасіння вибухом та ін.). Для моделювання таких технічних систем реалізовано загальний принцип нелінійного негативного зворотного зв'язку.

Системи подібного типу зазвичай моделюються сингулярними системами диференціальних рівнянь з малим параметром при старшій похідній і змінними в часі керуючими параметрами. Ці рівняння досить складні, щоб мати розв'язки в загальному аналітичному вигляді, а їх параметри досить швидко змінюються щоб утруднити чисельний розв'язок. Такі системи характеризуються порівняно простою структурою і складною поведінкою. До них відносяться не тільки системи пожежогасіння, захисту хімічних і ядерних реакторів, захисту

енергосистем, захисту від паводків і катастроф в житлово-комунальному господарстві (ЖКГ), а й деякі оборонні системи, наприклад, «активна броня».

В рамках цієї проблеми у дисертаційній роботі запропоновано актуальну науково-технічну задачу дослідження людино-машинних (ергатичних) систем із захистом від шкідливих або небезпечних чинників шляхом побудови їх динамічних моделей, та обчислювальні методи дослідження таких моделей. Ці методи засновані на роботах В.І. Арнольда, Н.Н. Боголюбова, В. Вазова, А.Б. Васильєвої, і є їх конкретизацією та модифікацією стосовно технічних систем із захистом.

Термін «захист» у рамках даної роботи розуміється в широкому сенсі, і позначає усі види технічних засобів (статичні і динамічні), а також, у першу чергу, заходи і процеси відновлення безпечної роботи підсистеми «машина», а не тільки ліквідація шкідливих впливів на навколишнє середовище і оператора.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки та наказом Міністерства освіти і науки України в рамках фундаментальної держбюджетної теми «Розробка методології і математичних моделей соціально-економічних систем при реалізації їх стійкого розвитку» розділ №293-4 «Розробка математичних моделей і методів управління стійким розвитком ЖКГ міста» (№ ДР 0115U001522), в якій дисертант був одним із співвиконавців, та госпдоговору (№ ДР 0117U 003827).

Мета та задачі дослідження. Метою є підвищення безпеки ергатичних систем з динамічним захистом за рахунок раціонального вибору їх параметрів, отриманих у результаті розробки математичних моделей та удосконалення обчислювальних методів їх аналізу.

Досягнення поставленої мети вимагало розв'язання таких задач:

- виділити клас ергатичних систем з динамічним захистом від шкідливих та небезпечних чинників;
- для виділеного класу технічних систем розробити досить загальну нелінійну динамічну модель процесів взаємодії джерел шкідливих викидів з системою динамічного захисту;
- дослідити умови стійкості та адаптованості ергатичних систем з динамічним захистом;
- провести структурування загальної моделі на часткові сингулярні підмоделі з примежовим шаром, які дозволяють адекватно описувати динаміку різних типів ергатичних систем з суттєво різними швидкостями виділення шкідливих чинників та захисту від них в початкових стадіях розвитку катастроф;
- модифікувати або розробити новий метод для дослідження динамічних властивостей ергатичних систем з динамічним захистом;
- розробити метод оцінювання та оптимізації параметрів вартості системи захисту в залежності від її технічних та динамічних властивостей.

Об'єкт дослідження – процеси взаємодії шкідливих факторів та захисту в ергатичних системах з динамічним захистом.

Предмет дослідження – нелінійні математичні моделі ергатичних систем з динамічним захистом.

Методи дослідження дисертаційної роботи ґрунтуються на комплексному використанні: системного аналізу для виявлення зв'язків, впливів та динамічних властивостей технічних систем з захистом; якісної теорії сингулярних диференціальних рівнянь, що моделюють такі системи, (далі скрізь – «сингулярні моделі») для виділення стаціонарних множин та умов їх стійкості; асимптотичних методів для дослідження моделей ергатичних систем із захистом з метою аналізу та поліпшення їх властивостей.

Наукова новизна отриманих результатів, які виносяться на захист:

- розроблено математичну модель ергатичних систем з динамічним захистом та її локалізовані варіанти у вигляді взаємозв'язаних диференціальних рівнянь з малим параметром, яка відрізняється від відомих наявністю регулярних та сингулярних збурень у широкому діапазоні співвідношень швидкостей взаємодії джерел шкідливих чинників та захисту від них;

- отримав подальшого розвитку метод побудови і аналізу сингулярної моделі з примежовим шаром шляхом побудови й оцінки точності асимптотичного розв'язку рівнянь для ергатичних систем з динамічним захистом;

- удосконалено обчислювальний метод асимптотичного розв'язку задач Коші з різними типами сингулярностей і нестационарністю параметрів керування, в рамках якого отримано аналітичний розв'язок задачі та оцінки значень малого параметра збурення для різних швидкостей шкідливого процесу;

- отримав подальшого розвитку метод аналізу ступеня стійкості ергатичних систем з урахуванням параметричної оцінки стійкості в околі точок катастроф при пошуку раціональних значень її параметрів;

- за допомогою чисельного експерименту виявлено наявність необмежених хаотичних рухів в неавтономній системі поблизу періодичного руху відповідної автономної ергатичної системи з захистом при зближенні періодів коливань.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи дозволяють оцінити стан і параметри технічних систем із захистом, які призводять до стійкого і швидкого подавлення виділення шкідливих факторів за прийнятну ціну. Результати роботи можуть знайти широке застосування при розробці підсистем захисту від шкідливих техногенних чинників, зокрема, в екологічно небезпечних виробництвах та інших системах «Л-М-С».

Результати роботи використані в навчальному процесі кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки для розробки лабораторних та курсових робіт в курсах «Імітаційне моделювання», «Теорія катастроф» та «Синергетичні методи в

економіці», а також тем кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів. Вони також впроваджені при виконанні фундаментальної держбюджетної теми (№ ДР 0115U001522), та госпдоговору (№ ДР 0117U 003827) для поліпшення безпеки та ефективності систем ЖКГ.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи опубліковані в роботах [1–15]. Усі положення, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Матеріали, які складають основу дисертаційної роботи, опубліковані в роботах [1, 2, 8, 11–13], виконаних одноосібно, складають особистий внесок здобувача.

У роботах [3–7, 9, 10, 14, 15], які виконані у співавторстві, дисертанту належать такі результати:

- у [3] здобувачем удосконалено метод виявлення сталих рухів для математичної моделі яка відрізняється тим, що включає зовнішній періодичний чинник для систем з захистом;

- у [4] здобувачем розроблено метод асимптотичних наближень до розв'язків рівнянь моделі ергатичних систем з захистом;

- у [5] автором розроблено математичну модель ергатичних систем з динамічним захистом у вигляді взаємозв'язаних диференційних рівнянь з малим параметром;

- у [6] отримав подальшого розвитку метод аналізу сингулярної моделі з примежовим шаром;

- у [7] здобувачу належить розширення методів дослідження ергатичних систем з швидкодіючими захисними підсистемами на випадок нестационарності параметрів системи під час проведення захисних заходів;

- у [9] автором виділені основні часткові сингулярні моделі, які описують класи систем з захистом, та розвинуті обчислювальні методи їх дослідження;

- у [10] запропоновано засіб використання динамічних моделей для оцінки вартості захисних систем за умови різних швидкостей шкідливого процесу і захисту;

- у [14] отримав подальшого розвитку метод аналізу ступеню стійкості ергатичних систем в стаціонарних множинах розширеного фазового простору;

- у [15] автором проведено чисельний експеримент для практично важливого класу неавтономних систем із збуренням швидкості зростання шкідливого чинника.

Апробація результатів дисертації. Наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах кафедри прикладної математики ХНУРЕ, а також на міжнародних конференціях, в тому числі:

- 3-я Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи і технології» (м. Харків, 2014 р.);

- 18-й Міжнародний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків, 2014 р. та 2015 р.);

- 4-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи і технології» (м. Харків, 2015 р.);

– International scientific and practical conference «World Science» (м. Дубай, ОАЕ, 2016 р.);

– 1-й Міжнародний науково-технічний семінар «Системний аналіз, комп'ютерне моделювання, інформаційні технології» (м. Харків, 2016 р.);

– 20-й Ювілейний Міжнародний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків, 2016 р.);

– Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи і технології» (Коблево – Харків, 2016 р.).

Публікації. Основні результати за темою дисертаційної роботи опубліковані в 15 друкованих роботах, з яких: 3 статті – у наукових фахових виданнях згідно переліком МОН України (з них 1 стаття – реферована в наукометричній базі Scopus); 3 статті – у закордонних наукових виданнях; 9 тез доповідей, опублікованих в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та 3 додатків на 9 сторінках. Дисертація містить перелік використаних джерел з 106 найменувань на 10 сторінках, а також 29 рисунків і 6 таблиць в основному тексті. Загальний обсяг роботи складає 153 сторінки, включаючи 134 сторінку основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, формулюються мета та завдання дослідження, стисло викладено зміст дисертації та її основні положення, виділено їх новизну і практичну цінність.

У першому розділі роботи розглянуті різні типи систем «людина-машина-середовище» із захистом та їх загальна модель, яка описує об'єкт з точки зору загальних принципів його безпечного функціонування. Відзначимо, що тут об'єктом впливу системи захисту є не об'єкт захисту як такий (людина і навколишнє середовище), а технічна система, що продукує шкідливий фактор. Проведено аналіз літературних джерел. Обрано класи об'єктів та їх моделей для дослідження в дисертаційній роботі (рис. 1). Наведено перелік та коротка характеристика технічних систем, які можуть бути описані диференціальними моделями. В першу чергу це система аварійного керування ядерним, або хімічним реактором, де «захистом» є використання спеціальних речовин (графітові стрижні, боромістяча рідина, хімічні реагенти-інгібітори та ін.). До подібних моделей зводяться і процеси пожежогасіння при локальних (точкових) джерелах загоряння, а також системи регулярного і аварійного управління водовідведенням в ЖКГ, де структура систем дозволяє виділити підсистеми джерела, датчиків, захисту / управління й ефекторів. Інша сучасна і перспективна структура об'єкта – з інтегрованим захистом – описана «синергетичної» моделлю. Сюди з деякими припущеннями належать «безпечні реактори», де реакція автоматично переривається при будь-якому виході параметрів за технологічні рамки, і військові інтегровані системи захисту, такі як «активна броня».

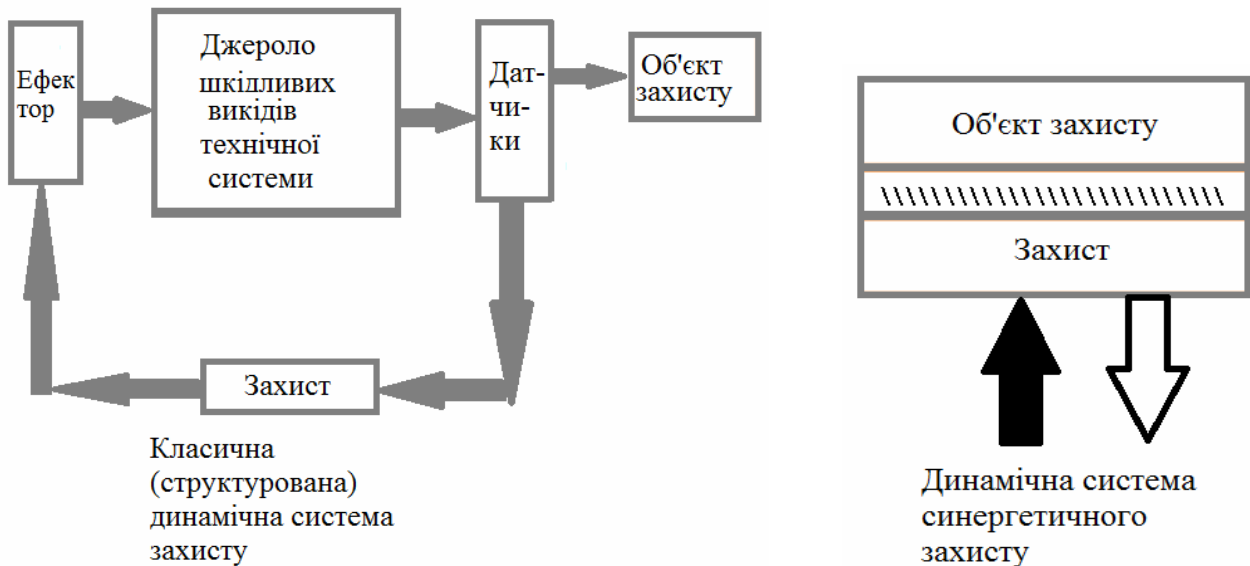


Рисунок 1 – Класи систем із захистом

У всіх розглянутих класах ергатичних системах з захистом, незалежно від предметної галузі і фізичного змісту, є такі загальні властивості:

– об'єктами є саме класи та їх загальні властивості, а не конкретна система;

– гладкість дозволяє використовувати для опису системи диференціальних рівнянь;

– нелінійність визначальна для складної динаміки, навіть для мало-розмірних систем (лінеаризація – розв'язання систем у варіаціях – дозволяє лише трохи спростити ситуацію);

– параметрична ідентифікація моделей тут дуже специфічна, оскільки інтерес представляють не конкретні значення параметрів, а їх порядок величин, особливо швидкостей їх зміни. Зокрема, від порядку величин малого параметру залежить, чи дійсно модель сингулярна, та адекватність застосування асимптотичних методів;

– з огляду на катастрофічність досліджуваних процесів, достовірні вимірювання їх протікання можливі лише на полігонах, а не на реальних об'єктах. Чисельні значення параметрів процесу нестабільні і залежать як від часу, так і від незорного числа зовнішніх факторів, упорядкувати які можна тільки в процесі модельного експерименту;

– виходячи з цього треба розглядати не тільки конкретні значення параметрів, а параметричну сталість системи та її моделі.

Для подальшого позначимо $u(t)$ – інтенсивність продукування ергатичною системою в процесі її роботи побічного шкідливого фактору будь якої природи; $z(t)$ – інтенсивність дії захисної підсистеми.

У рамках даної проблеми, у першому розділі роботи виділено клас ергатичних систем з захистом та вперше розроблено частинні (локальні) математичні моделі ергатичних систем з динамічним захистом у вигляді взаємозв'язаних диференціальних рівнянь з малим параметром.

У якості задачі для дослідження поставлена побудова частинних типів моделей ергатичних систем «людина-машина-середовище з захистом», кожна з яких адекватно описує деяку практично важливу якість об'єкта захисту, джерела шкідливого чинника або захисної системи, а всі разом – описують систему з точки зору її безпечного функціонування. Їх деталізація вимагає розробки деяких нових моделей підсистем захисту, удосконалення математичних методів опису їх функціонування та оцінки вартості їх створення і роботи. Матеріали даного розділу опубліковані в роботах автора [5, 6].

У другому розділі отримані такі основні результати:

– для технічних систем із захистом, описаних в розділі 1 розроблено математичну модель у вигляді взаємозв'язаних диференціальних рівнянь з малим параметром, яка відрізняється від відомих присутністю регулярних та сингулярних збурень, та використання якої дозволило описати всі можливі співвідношення швидкостей взаємодії джерел шкідливих чинників та системи захисту від них. Перше з рівнянь описує об'єкт, який виділяє шкідливий чинник з інтенсивністю $u(t)$. Друге – описує інтенсивність $z(t)$ системи захисту. З властивостей технічної системи витікають особливості структури прямих частин рівнянь:

$$\phi(0, z) = F(u, 0) = 0, \quad \forall u, z > 0, \quad \text{або} \quad F(0, 0) = 0,$$

або модель Колмогорова $u' = u \cdot \phi(u, z)$, $z' = z \cdot F(u, z)$, де $\phi(u, z) \leq 0$ – штатна ситуація, $\phi(u, z) > 0$ – критична ситуація (аварія).

Загальна динамічна модель системи з захистом деталізована (рис. 2) згідно типам функцій захисних систем $F(u, z)$, що входять до неї.



Рисунок 2 – Аналіз динамічних моделей систем з захистом

Проведено аналіз стійкості стаціонарних станів:

– отримав подальший розвиток метод побудови і аналізу стаціонарних множин часткової сингулярної моделі ергатичної системи з динамічним захистом;

– зроблено аналіз ступеня стійкості ергатичних систем з синергетичним захистом, що дозволило оцінити параметричну стійкість системи при пошуку раціональних значень її параметрів поблизу точок катастроф і визначити ступінь стійкості ергатичних систем при різних варіаціях біфуркаційних параметрів;

– для аналізу ергатичної системи із захистом вперше був використаний асимптотичний метод розв'язання її диференціальної моделі

$$\begin{cases} u' = \varepsilon \alpha u - \beta u z, \\ \varepsilon z' = F(u, z, t) \end{cases}$$

і отримані замкнуті формули для наближеного по малому параметру ε розв'язку;

– граничне значення параметру $\varepsilon=0.0001$ було отримано шляхом чисельного розв'язку вихідної системи, і це означає що адекватність і переваги асимптотичного підходу і малість параметра ε в порівнянні з іншими підтверджується;

– знайдені вирази для інтенсивності захисту дозволяють визначити його оптимальне за вартістю значення.

На додаток до отримання розв'язку в замкнутій аналітичній формі і його дослідження, цей підхід дозволяє отримати реальні оцінки за вартістю захисту і навіть знизити цю вартість в часі, коли інтенсивність шкідливого фактору $u(t)$ не перевищує поріг динамічного захисту $C(z_0(t)-z_0) = 0$.

Асимптотичний підхід виявився дуже ефективним, проте, отримані розв'язки самі сингулярні при $t=0$. Це не є перешкодою для застосування методу. Такі властивості мають навіть класичні моделі (у фізиці – електростатика і ньютонівська теорія тяжіння). Моделі даного розділу адекватні при $t \geq t_0 > 0$. Для поширення моделі на початкові моменти, коли тільки включається підсистема захисту, необхідний облік в моделі, так званого, «примежового шару». Це питання розглядається далі в третьому розділі.

Матеріали даного розділу опубліковані в роботах автора [7, 8, 12 –14].

У третьому розділі удосконалено обчислювальний метод асимптотичного розв'язку задач Коші з різними типами сингулярностей і нестаціонарністю параметрів керування, що дозволило аналітично отримати розв'язок сформульованої задачі для різних швидкостей шкідливого процесу і захисту. Отримано оцінки значень малого параметра збурення які забезпечують прийнятну для технічних розрахунків точність.

Для цього була досліджена система з двох диференціальних рівнянь з малим параметром, що визначає поведінку системи захисту від шкідливих

впливів з моменту їх виникнення. Був використаний асимптотичний метод побудови розв'язку для системи рівнянь і отримані нульові і перші члени ряду асимптотики з урахуванням «примежового шару». Шляхом чисельного експерименту отримано значення малого параметра що забезпечує високу точність розрахунку з самого початку ліквідації аварії, тобто в примежовому шарі. Графік зміни похибки в часі наведено на рис. 3.

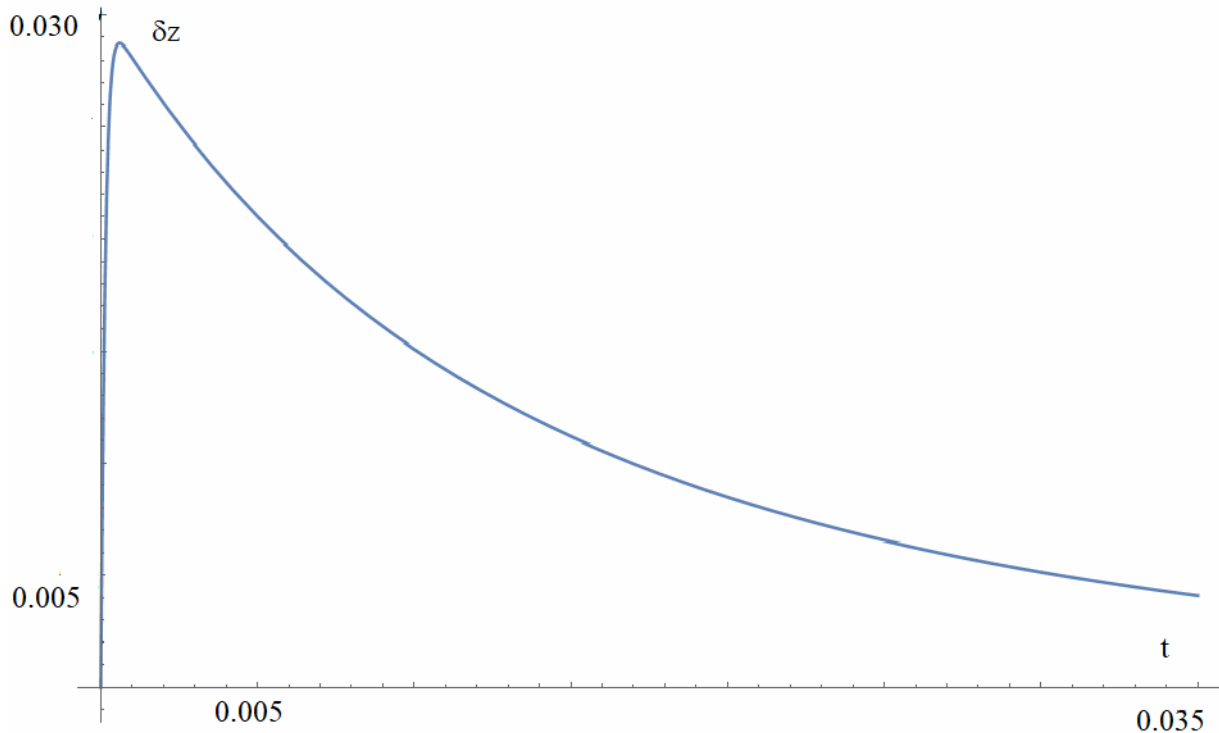


Рисунок 3 – Графік похибки асимптотичного розв'язку відносно чисельного для функції захисту, побудованої нульовим членом регулярної та примежової частини асимптотики

Даний підхід дозволив спростити побудову розв'язків для різних параметрів системи і тим самим спростив дослідження моделі.

Також запропоновані два варіанти обчислення функції вартості роботи системи з моменту її включення. Оскільки при даних умовах задача мінімізації функції вартості виявилася нерозв'язною, було запропоновано мінімізувати функцію вартості всієї системи, тобто вартості покупки системи і вартості обслуговування системи протягом усього часу роботи.

Була запропонована наступна функція вартості:

$$c(z) = \int_0^t (z(\tau) - z_c + K \max[0, z'(\tau)]) d\tau + C_0,$$

де коефіцієнт K вибирається з міркувань вкладу вартості швидкості реакції в загальну вартість. Функція вартості робочого циклу набула вигляду:

$$S(\beta, \varepsilon) = n \cdot c(z(t)) + \phi(\varepsilon, \beta),$$

де $\phi(\varepsilon, \beta) = \beta/2\varepsilon$ – функція вартості покупки системи захисту.

Даний підхід дозволив мінімізувати вартість системи захисту для певного фактору забруднення і отримати оцінку мінімальної середньої вартості всієї системи.

Результати застосовні на практиці, якщо правильно вибрати функцію вартості покупки системи. У даній частині була запропонована модельна функція, яка задовольняла умовам завдання, і відображала фізичний зміст моделі системи ЖКГ, наведеної в розділі 1 та Додатку Б.

Основні результати цього розділу опубліковані в роботах [4, 14, 15].

У четвертому розділі розроблено методики розрахунку динаміки моделей систем з виділенням різних типів шкідливих факторів і різних швидкостей і принципів спрацьовування захисту, що дозволило аналітично досліджувати явні залежності динаміки ліквідації аварій від біфуркаційних параметрів системи.

За допомогою чисельних експериментів для різних типів захистів, описуваних правими частинами лінеаризованого поблизу стаціонарної точки матричного рівняння $\varepsilon \bar{X}'_t = [A_0(t) + \varepsilon A_1(t)] \bar{X}$, при різних типах залежностей параметрів системи від часу, показано, що при ε від 10^{-3} до 10^{-5} розмір похибки асимптотичного методу зменшується з 10% до 1%, що цілком припустимо для технічних розрахунків. Перевагою такого методу, очевидно, є наявність досить коротких формул для розв'язку, що дозволяє аналізувати поведінку системи в процесі захисту при зміні керуючих параметрів і власних параметрів об'єкта захисту.

Проведено дослідження проблеми динамічного балансу в ергатичній системі із захистом при зовнішньому збуренні інтенсивностей шкідливих викидів, яке моделюється малим по амплітуді синусоїдальним збуренням правої частини базової моделі.

Тут Ω – частота періодичних збурень, що близька до частоти циклу без збурень. Після нормування параметрів $s = r = \gamma_1 = \gamma_2 = 1$, рівняння набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= -(\eta + \xi\eta), \\ \frac{d\eta}{dt} &= \xi + \xi\eta - m\eta \cos \Omega t. \end{aligned}$$

Застосування методів якісної теорії диференціальних рівнянь пророкує необмежені хаотичні рухи при збігу періодів в неавтономній системі поблизу періодичного розв'язку автономної. Чисельні експерименти показують, що:

а) фазові портрети систем, схожі на відомі у фізиці «фігури Ліссажу» і мають тип, що вироджується до 2-мірного нерезонансного тора;

б) різні за характером нерегулярності поведінки «захисту» та «шкідливості» проявляються в фазових портретах при однакових збурення;

в) синусоїдальний вплив на інтенсивності, наприклад шляхом зміни швидкості росту однієї або обох змінних внаслідок сезонних або погодних змін, призводить до неперіодичної динаміці системи;

г) визначені параметри збурень, що призводять поблизу «резонансу» $\Omega=1/T$, як до неперіодичного зростання виділення шкідливості, так і до неперіодичних рухів в кінцевій області, або до стабілізації поблизу нуля. При цьому можлива ліквідація аварії шляхом обнулення обох змінних.

Все це підтверджує, що навіть досить прості моделі систем захисту виявляють їх нестійкість – чутливість до малих зовнішніх збурень.

На рис. 4 наведено результати чисельного моделювання втрати стійкості циклів за початкових умов $\xi_0 = \eta_0 = 0.1$. Біфуркаційне значення параметра n , очевидно є нуль. При $n = 0.1$ має місце необмежене зростання коливань, а при $n = 0.15$ вже настає хаос. Початкові значення $\xi_0=x(0)$, $\eta_0=y(0)$ вибрані так, щоб при $n=0$ траєкторія перебувала в області тяжіння до особливої точки (x_*, y_*) в системі координат XOY .

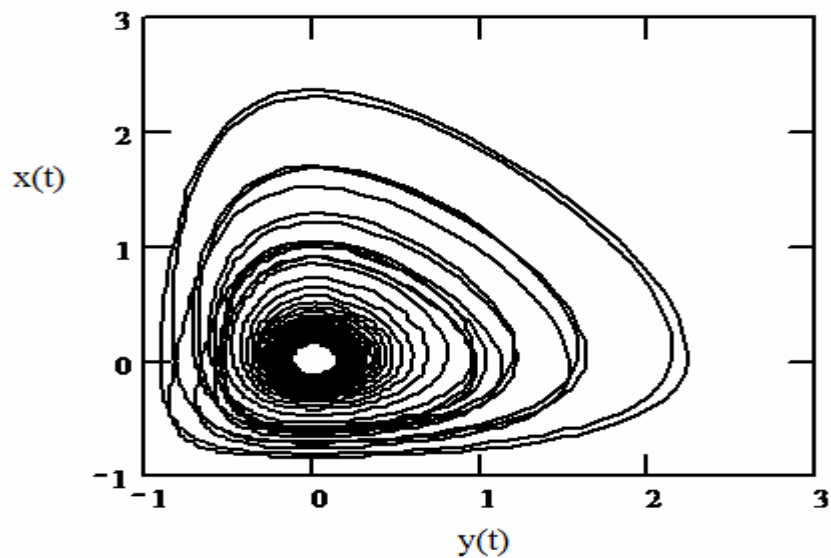


Рисунок 4 – Фазовий портрет хаотичної динаміки системи при $n=0.15$

Причина появи хаосу тут та сама, що і для появи нерезонансного тора при розмірності задач $N>2$. А саме, неавтономність системи в результаті явно залежного від часу періодичного збурення з періодом, неспівмірні з періодом власного руху. Зауважимо, що взагалі хаотичні рухи можуть з'являються і тут, а не тільки в околі дивних атракторів, яких у даній задачі бути не може, зважаючи на її малу розмірність ($N=2$).

Рівняння не симетричні відносно змінних. Також було досліджено і випадок, коли абсолютна швидкість захисту має періодичну складову $m \sin \Omega t$, де Ω , m – біфуркаційні параметри.

Основні результати цього розділу опубліковані в роботах [1 – 3, 9 – 11].

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного в дисертаційній роботі дослідження вирішено одну з важливих науково-технічних задач дослідження ергатичних систем із захистом від шкідливих або небезпечних чинників шляхом побудови їх динамічних моделей, та розроблені обчислювальні методи дослідження таких моделей.

У процесі вирішення поставлених завдань поліпшення безпеки ергатичних систем з динамічним захистом в роботі отримано такі найважливіші наукові та практичні результати:

1. На основі аналізу сучасного стану проблеми, літературних джерел та характерних ознак нелінійних динамічних систем із захистом розроблено їх локалізовані (частинні) математичні моделі у вигляді взаємозв'язаних диференційних рівнянь з малим параметром, які відрізняється від відомих присутністю регулярних та сингулярних збурень. Вони описують всі можливі співвідношення швидкостей взаємодії джерел шкідливих чинників та захисту від них, що дозволило виділити три характерні часткові динамічні моделі з малим параметром для подальшого дослідження.

2. Отримав подальший розвиток метод побудови і аналізу стаціонарних множин часткової сингулярної моделі з примежовим шаром, використання якого дозволило отримати умови стійкості ергатичної системи з динамічним захистом.

3. Удосконалено обчислювальний метод асимптотичного розв'язку задач Коші з різними типами сингулярностей і нестационарністю параметрів керування, що дозволило аналітично отримати розв'язок сформульованої задачі для різних швидкостей шкідливого процесу і захисту. Отримано оцінки значень малого параметра збурення, які забезпечують прийнятну для технічних розрахунків точність.

4. Отримав подальшого розвитку метод аналізу ступеня стійкості ергатичних систем з синергетичним захистом, що дозволило оцінити параметричну стійкість системи поблизу точок катастроф і визначити ступінь стійкості ергатичних систем при різних варіаціях біфуркаційних параметрів.

5. В рамках загальної концепції негативного зворотнього зв'язку отримано методи розрахунку динаміки моделей систем з виділенням різних типів шкідливих факторів і різних швидкостей та принципів спрацьовування захисту, що дозволило аналітично досліджувати явні залежності динаміки ліквідації аварій від біфуркаційних параметрів системи, які призводять до стійкого і швидкого подавлення виділення шкідливих факторів за прийнятну вартість.

6. Для ергатичних систем з захистом, за допомогою чисельного експерименту, виявлено наявність необмежених хаотичних рухів в неавтономній системі поблизу періодичного розв'язку відповідного автономного диференціального рівняння при збігу періодів коливальності.

Усі вище наведені наукові та практичні результати є новими та відповідають сучасному рівню наукових і технічних знань, що підтверджено

публікаціями здобувача у фахових та закордонних виданнях [1 – 6].

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів і висновків дисертаційної роботи забезпечується і підтверджується коректним використанням основних положень відомого і апробованого математичного апарату, який раніше неодноразово був перевірений порівнянням з експериментальними дослідженнями, і застосуванням результатів роботи.

Результати роботи впроваджені при виконанні фундаментальної держбюджетної теми (№ держреєстрації 0115U001522), та госпдоговору (№ держреєстрації 0117U 003827).

Отримані теоретичні результати також впроваджені в навчальний процес кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки для розробки лабораторних та курсових робіт в курсах «Імітаційне моделювання», «Теорія катастроф» та «Синергетичні методи в економіці», а також тем кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів.

По результатах дисертаційної роботи можна зробити наступні висновки, які підтверджують науково-технічну значущість роботи:

- модель з нелінійним негативним зворотним зв'язком описує загальні властивості широкого класу ергатичних систем з динамічним захистом від шкідливих техногенних факторів;

- асимптотичний метод продуктивний для аналізу динаміки систем, характерний час процесів в яких різниться на кілька порядків;

- похибка асимптотичного методу для обраних лінеаризованих багатовимірних сингулярних систем з захистом при розглянутих швидкостях протікання процесів не перевищує 1%;

- наявність малого параметра в правій частині неавтономних рівнянь моделей, як регулярних так і сингулярних систем, при певних поєднаннях параметрів призводить до хаотичної динаміки.

- напрямки теоретичних і практичних досліджень дисертаційної роботи доцільно розвивати в області створення і використання асимптотичних методів в моделюванні технічних систем, та побудови моделей для більш детального урахування складних процесів динаміки ергатичних систем з захистом від шкідливих техногенних чинників.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Альджаафрах М.Р. Неустойчивость динамического баланса в системах Лотки-Вольтерра с возмущением правой части // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2. № 4 (68). С. 47–50.

2. Альджаафрах М.Р. Численное исследование устойчивости в системах Лотки-Вольтерра с возмущенной правой частью // Технологический аудит и резервы производства. 2014. Т. 3. № 1(17). С. 20–22.

3. Альрефаи В.А., Альджаафрах М.Р. Разработка методов исследования устойчивых движений в системах Лотки-Вольтерра с периодическими возмущениями // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 1. № 4(73). С. 58–61.

4. Альрефаи В.А., Наумейко И.В., Альджаафрех М.Р. Исследование асимптотик систем с защитой // *Sciences of Europe*. 2016. Т. 1. № 8(8). С. 63–68.
5. Naumeyko I.V., Alja'afreh M. Dynamic balance research of protected systems // *Econtechmod*. 2015. V. 4. № 3. P. 85–90.
6. Naumeyko I.V., Alja'afreh M.R. Investigation of the dynamics of singular protected systems // *Econtechmod*. 2016. V. 5. № 4. P. 37–42.
7. Наумейко И.В., Альджаафрех М.Р., Альрефаи В.А. Моделирование сингулярных динамических систем защиты с переменными параметрами // *International scientific and practical conference «World Science»* 2016. Т. 1. № 11(15). С. 15–17.
8. Alja'afreh M.R. Solving the problem of optimal parametric synthesis of infocommunication system with the maximum bandwidth // *Материалы 1-го международного научно-технического семинара САКМИТ-2016, 19–23 декабря 2016 г.: тезисы докладов*. Харьков: ДРУКАРНЯ МАДРИД, 2017. С. 9–10.
9. Альджаафрех М.Р., Наумейко И.В. Математические модели и методы исследования динамического баланса в одном классе нелинейных систем // *Информационные системы и технологии: материалы 3-й Международной научно-технической конференции, 15–21 сентября 2014 г.* Харьков: ХНУРЭ, 2014. С. 121–122.
10. Альджаафрех М.Р., Наумейко И.В. Математические модели нарушения динамического баланса в одном классе нелинейных систем // *Информационные системы и технологии: материалы 4-й международной научно-технической конференции, 21–27 сентября 2015 г.* Харьков: ХНУРЭ, 2015. С. 24–25.
11. Альджаафрех М.Р. Хаотические движения в системах Лотки-Вольтерра с периодическим возмущением правой части // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVIII Международного Молодежного Форума, 14–16 апреля 2014 г.* Харьков: ХНУРЭ, 2014. С. 52–53.
12. Альджаафрех М.Р. Асимптотики для модели системы с защитой // *Радиоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали XX Ювілейного Міжнародного Молодіжного Форуму 19–21 квітня 2016 р.* Харків: ХНУРЕ, 2016. С. 60–61.
13. Альджаафрех М. Р. Математические модели и методы исследования нелинейных динамических систем с сингулярными возмущениями // *Информационные системы и технологии: материалы 5-й международной научно-технической конференции, 12–17 сентября 2016 г.* Коблево – Харьков: ХНУРЭ, 2016. С. 91–92.
14. Альджаафрех М.Р., Наумейко И.В. Математические модели нелинейных систем динамической защиты с сингулярными возмущениями // *Материалы 1-го международного научно-технического семинара САКМИТ-2016, 19–23 декабря 2016 г.: тезисы докладов*. Харьков: ДРУКАРНЯ МАДРИД, 2017. С. 13–14.
15. Альджаафрех М.Р., Наумейко И.В. Using dynamical system in industrial production // *Радиоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали XX*

Ювілейного Міжнародного Молодіжного Форуму 19–21 квітня 2016 р. Харків: ХНУРЕ, 2016. Том 7. С. 56–57.

АНОТАЦІЯ

Мохаммад Ракан Абед Алнабі Альджаафрах. Математичне моделювання та обчислювальні методи дослідження ергатичних систем з динамічним захистом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Проблема підвищення безпеки людино-машинних (ергатичних) систем була та залишається надзвичайно актуальною. Її розв'язання здійснюється шляхом вбудовування в ергатичну систему спеціально розробленої підсистеми захисту та підвищення швидкодії динамічного захисту до гранично досяжних значень при обмеженнях на її вартість.

У дисертаційній роботі запропоновано вирішення актуальної науково-практичної задачі підвищення безпеки ергатичних систем з динамічним захистом від шкідливих та небезпечних чинників.

Метою дисертаційної роботи є підвищення безпеки ергатичних систем з динамічним захистом за рахунок розробки математичних моделей та удосконалення обчислювальних методів їх аналізу.

Для досягнення поставленої мети вирішені завдання: виділення класу ергатичних систем з динамічним захистом від шкідливих та небезпечних чинників; розробки нелінійної моделі процесів взаємодії джерел шкідливих викидів з системою динамічного захисту; дослідження умов стійкості та адаптованості ергатичних систем з динамічним захистом; проведення структуризації загальної моделі на часткові сингулярні підмоделі з примежовим шаром, які дозволяють адекватно описувати динаміку різних типів ергатичних систем з суттєво різними швидкостями виділення шкідливих чинників та захисту від них в початкових стадіях розвитку катастроф; модифікації або розробки нового асимптотичного методу для дослідження динамічних властивостей ергатичних систем з динамічним захистом; розробки методу оцінювання та оптимізації вартості системи захисту в залежності від її технічних та динамічних властивостей.

Методи дослідження дисертаційної роботи ґрунтуються на комплексному використанні: системного аналізу для виявлення зв'язків, впливів та динамічних властивостей технічних систем з захистом; якісної теорії сингулярних диференціальних рівнянь, що моделюють такі системи, для виділення стаціонарних множин та умов їх стійкості; асимптотичних методів для дослідження моделей ергатичних систем із захистом з метою аналізу та поліпшення їх властивостей.

Сучасні та перспективні системи мають бути максимально захищені, проте безпека і ефективність виробництва та життєдіяльності є суперечливими

критеріями. Динамічні системи із захистом від шкідливих природних чи техногенних факторів включають велику кількість процесів з різними характерними часом, причому ієрархія цих часів така, що вони розрізняються на багато порядків. Системи подібного типу моделюються сингулярними системами диференціальних рівнянь зі змінними в часі зовнішніми параметрами. Вони є досить складними щоб мати розв'язок в загальному аналітичному вигляді, але внутрішні параметри досить швидко змінюються, що дуже утруднює чисельне розв'язання рівнянь. Такі системи характеризуються порівняно простою структурою і складною поведінкою. До них відносяться не тільки системи пожежогасіння, захисту хімічних і ядерних реакторів, захисту енергосистем, захисту від паводків і катастроф в житлово-комунальному господарстві, а й деякі оборонні системи.

У дисертаційній роботі отримані такі нові наукові результати:

- розроблено математичну модель ергатичних систем з динамічним захистом та її локалізовані варіанти у вигляді взаємозв'язаних диференціальних рівнянь з малим параметром, яка відрізняється від відомих наявністю регулярних та сингулярних збурень у широкому діапазоні співвідношень швидкостей взаємодії джерел шкідливих чинників та захисту від них;

- отримав подальшого розвитку метод побудови і аналізу сингулярної моделі з примежовим шаром шляхом побудови й оцінки точності асимптотичного розв'язку рівнянь для ергатичних систем з динамічним захистом;

- удосконалено обчислювальний метод асимптотичного розв'язку задач Коші з різними типами сингулярностей і нестационарністю параметрів керування, в рамках якого отримано аналітичний розв'язок задачі та оцінки значень малого параметра збурення для різних швидкостей шкідливого процесу;

- отримав подальшого розвитку метод аналізу ступеня стійкості ергатичних систем з урахуванням параметричної оцінки стійкості в околі точок катастроф при пошуку раціональних значень її параметрів;

- за допомогою чисельного експерименту виявлено наявність необмежених хаотичних рухів в неавтономній системі поблизу періодичного руху відповідної автономної ергатичної системи з захистом при зближенні періодів коливальності.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи дозволяють оцінити стан і параметри технічних систем із захистом, які призводять до стійкого і швидкого подавлення виділення шкідливих факторів за прийнятну ціну.

Результати роботи використані в навчальному процесі кафедри прикладної математики Харківського національного університету. Вони також впроваджені при виконанні фундаментальної держбюджетної теми (№ держреєстрації 0115U001522) та госпдоговору (№ держреєстрації 0117U003827) для поліпшення безпеки та ефективності систем ЖКГ.

Ключові слова: ергатичні системи, захист, шкідливі чинники, математична модель, негативний зворотній зв'язок, проблеми стійкості, атрактор, збурення, сингулярність.

АННОТАЦИЯ

Мохаммад Ракан Абед Алнабі Альджаафрах. Математическое моделирование и вычислительные методы исследования эргатических систем с динамической защитой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Целью диссертации является повышение безопасности эргатических систем с динамической защитой путем оценки параметров разработанных математических моделей и совершенствования вычислительных методов их анализа.

Методы исследования основаны на комплексном использовании системного анализа для выявления динамических свойств технических систем с защитой; качественной теории сингулярных дифференциальных уравнений для определения стационарных множеств и условий их устойчивости. Использовались также асимптотические методы и численное моделирование, вычислительные методы решения соответствующих систем дифференциальных уравнений для эргатических систем с защитой.

В диссертационной работе получены такие новые научные результаты:

- разработана математическая модель эргатических систем с динамической защитой;

- метод анализа сингулярных систем с пограничным слоем получил дальнейшее развитие путем построения и оценки точности асимптотического решения для эргатических систем с динамической защитой;

- вычислительный метод асимптотического решения задач Коши с различными типами особенностей и нестационарностью параметров управления улучшен путем оценки малого параметра возмущения для разных скоростей вредного процесса;

- получил дальнейшее развитие метод анализа устойчивости систем с защитой;

- с помощью численного эксперимента выявлено наличие неограниченных хаотических движений в неавтономной системе вблизи периодического движения соответствующей автономной эргатической системы с защитой, при сближении их периодов колебаний.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанные методы позволяют оценить состояние и параметры технических систем с защитой, что приводит к устойчивому и быстрому подавлению локальных вредных факторов по доступной цене. Представленные методы также используются в учебном процессе Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Ключевые слова: эргатические системы, защита от вредных факторов, математическая модель, отрицательная обратная связь, проблемы устойчивости, аттрактор, возмущение, сингулярность.

ABSTRACT

Mohammad Rakan Abed Alnabi Alja`afreh. Mathematical modeling and computational methods for research of ergatic systems with dynamic protection.

– The manuscript.

The thesis for the candidate of technical sciences degree on a specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The purpose of dissertation was to increase the safety of ergatic systems with dynamic protection by assessing the best parameters for the developed mathematical models and improving the computational methods for their analysis.

The research methods are based on the integrated use of system analysis for revealing of influences and dynamic properties of technical systems with protection; qualitative theory of singular differential equations to allocate stationary sets and conditions of their stability. Asymptotic methods and numerical simulation, computational methods for solving the corresponding systems of differential equations for ergatic systems with protection were also used.

In the dissertation work the new scientific results are obtained, such as:

– the modified mathematical model of ergatic systems with dynamic protection was developed;

– the method of a singular model analysis with an boundary layer received its further development by constructing and evaluating the accuracy of asymptotic solution for ergatic systems with dynamic protection;

– the computational method for the asymptotic solution of Cauchy problems with different types of singularities and non-stationary control parameters has been improved with estimation of the small perturbation parameter for different speeds of the harmful process;

– the method for analysis of protected systems` stability received its further development;

– the presence of unconstrained chaotic motions in a non-autonomous system near the periodic motion of a corresponding autonomous ergatic system with protection at convergence of their oscillation periods was revealed with the help of numerical experiment.

The practical value of the results obtained is that the developed methods allow us to assess the state and parameters of technical systems with protection, that leads to a steady and rapid suppression of the local harmful factors at an affordable price. The presented methods are also used in educational process of Kharkiv National University of Radioelectronics.

Keywords: ergatic systems, protection of harmful factors, mathematical model, negative feedback, stability problems, attractor, perturbation, singularity.

Підп. до друку 13.03.2018. Формат 60x84 1/16. Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 0,9. Облік. вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим.
Ціна договірна. Зам № 285/2

Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 7

Віддруковано з готового оригінал-макету у
друкарні ФОП Грищенко О.М.
Тел. 057 719-52-65
Центр цифрової поліграфії.