

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Юхимчук Марія Сергіївна**

УДК 681.5.017+681.516.75

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ З ЛОГІЧНИМИ  
УПРАВЛЯЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент  
**Москвіна Світлана Михайлівна,**  
Вінницький національний технічний університет,  
доцент кафедри комп'ютерних систем управління

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Данилов Валерій Якович,**  
Інститут прикладного системного аналізу, м. Київ,  
професор кафедри математичних методів системного аналізу

доктор технічних наук, професор  
**Коваленко Ігор Іванович,**  
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,  
професор кафедри програмного забезпечення  
автоматизованих систем

Захист відбудеться “30” березня 2013 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “28” лютого 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** В наш час розвитку промисловості в Україні важливою задачею є розробка високотехнологічних автоматичних систем управління, які забезпечують високонадійне управління складними нелінійними нестационарними об'єктами. Збільшені вимоги до якості та точності управління призводять до необхідності використання законів логічного управління. Для формування таких законів управління в автоматичних системах застосовуються логічні управляючі пристрої, які дають можливість покращити динамічні властивості таких систем.

Логічне управління нині широко використовується при керуванні нестационарними об'єктами, параметри яких і завади, що діють на ці об'єкти в процесі їх роботи, змінюються в широких межах. Із самої сутності такого управління слідує, що динаміка автоматичних систем цього класу описується нелінійними диференціальними рівняннями.

Для дослідження режимів роботи системи та залежності їх від параметрів елементів в інженерній практиці широке застосування знаходять наближені методи моделювання, і зокрема, метод гармонічної лінеаризації, які дають можливість визначити вищі гармоніки та уточнити амплітуду й частоту основної гармоніки. При цьому слід особливо підкреслити, що дуже важко забезпечити незмінність параметрів систем будь - якого класу при їх використанні у реальних промислових умовах, в яких практично неможливо позбутися від таких неконтрольованих збурень як температура, вологість, запиленість, вібрації, електромагнітні завади, тощо. Першою задачею аналізу автоматичних систем управління з логічними управляючими пристроями систем є задача оцінки їх стійкості. Задача про абсолютну стійкість нелінійних нестационарних автоматичних систем була поставлена радянськими вченими А.І.Лур'є та В.Н. Постніковим в 1944 році. Це була перша спроба визначення стійкості систем зі змінними параметрами. В розв'язок даної задачі внесли вклад Н.Н.Красовський, В. Я. Якубович, А.М. Летов, Б.І. Мокін, С.В. Юхимчук, зарубіжні дослідники А. Акер, М. Фрідман, Г. Зеймс, Дж. Віллемс. Румунський вчений В.М. Попов запропонував критерій стійкості, який дозволяв визначати стійкість систем, параметри нелінійних елементів яких змінюються під дією різноманітних факторів. У 1973 році Є.С. П'ятницьким було доведено, що критерій В.М. Попова не є необхідною умовою абсолютної стійкості. Новий підхід до розв'язання задач оцінки стійкості систем при зміні параметрів запропонував російський вчений В.Л.Харітонов.

Однак, існуючі методи моделювання поведінки автоматичних систем з логічними управляючими пристроями не враховують зміни параметрів релейних давачів, що формують вхідні сигнали логічних управляючих пристроїв при впливі на них неконтрольованих параметричних збурень. Такі зміни можуть призвести до того, що самі автоколивання стають нестійкими.

Тому потребує розв'язання задача моделювання та дослідження параметрів автоколивань в автоматичних системах, що керується логічними управляючими пристроями, при неконтрольованих змінах параметрів сигналів релейних датчиків.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась відповідно до планів науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт Вінницького національно технічного університету:

- в рамках держбюджетної НДР 46-Д-344 – «Розробка методів та засобів прийняття рішень при управлінні технологічними процесами, що розгалужуються в умовах невизначеності» (№ держреєстрації 012U001367);
- в рамках госпдоговірної роботи „Розробка АРМУ для керівника гасіння пожежі на об'єктах залізничного транспорту. Перша черга” №4706 (№ держреєстрації 0104U005500) між Вінницьким національним технічним університетом та Державною адміністрацією залізничного транспорту України „Укрзалізниця”, у яких автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є забезпечення стійкого функціонування систем з логічними управляючими пристроями в умовах неконтрольованих

змін їх параметрів на основі нових та удосконалених методів моделювання таких систем.

Для досягнення вказаної мети в роботі розв'язуються такі основні задачі:

- аналіз сучасного стану моделювання та дослідження систем автоматичного керування з логічними управляючими пристроями;
- аналіз параметричних збурень, що впливають на роботу автоматичних систем з логічними управляючими пристроями;
- розробка методу моделювання автоматичної системи з логічними управляючими пристроями при впливі на них неконтрольованих параметричних збурень;
- отримання математичних співвідношень для визначення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічних управляючих пристроїв при впливі на них неконтрольованих параметричних збурень;
- розробка узагальненого підходу до аналізу впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями;
- розробка математичних моделей автоколивань при впливі неконтрольованих параметричних збурень в системі;
- розробка методу оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями;
- розробка методу аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень;
- дослідження адекватності розроблених математичних моделей автоколивань при впливі неконтрольованих параметричних збурень в автоматичних системах з логічними управляючими пристроями.

*Об'єкт дослідження* - процеси в автоматичних системах із змінними параметрами, складовими яких є логічні управляючі пристрої, в умовах дії параметричних збурень.

*Предметом дослідження* є математичні моделі та методи моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями в умовах дії параметричних збурень.

В дисертаційній роботі використані такі **методи дослідження**: положення та методи теорії автоматичного керування для розробки методу моделювання автоматичної системи з логічними управляючими пристроями, методи гармонічного аналізу для знаходження коефіцієнтів гармонічної лінеаризації, методи аналізу стійкості релейних автоматичних систем для аналізу методів оцінки стійкості автоматичних систем управління з логічними управляючими пристроями, положення та методи теорії коливань для визначення параметрів автоколивань автоматичної системи з логічними управляючими пристроями, теорія оцінювання для дослідження адекватності розроблених моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У процесі розв'язання поставлених задач автором отримані наступні наукові результати:

1. Вперше розроблений метод моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який відрізняється параметричним поданням збурень, що дає можливість отримати аналітичну модель логічного управляючого пристрою меншої складності і спростити процес отримання характеристик системи в широкому діапазоні значень збурень.

2. Вперше отримані аналітичні залежності для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації рівняння логічного управляючого пристрою, які на відміну від існуючих, враховують вплив неконтрольованих параметричних збурень на автоматичні системи з логічними управляючими пристроями, що дозволяє аналітично оцінити стійкість таких систем в просторі параметрів.

3. Вперше розроблений метод оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який відрізняється аналітичною формою подання області стійкості таких систем, що дає можливість визначити границі стійкості і параметри автоколивань.

4. Удосконалено метод аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями, який дозволяє здійснити оцінювання чутливості вихідного сигналу до

неконтрольованих збурень первинних параметрів, що дає можливість проектувати системи інваріантні до таких збурень.

***Практичне значення одержаних результатів:***

- розроблена методика моделювання та дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями на прикладі автоматичної системи пожежогасіння, що використовується на залізничному транспорті;

- розроблений алгоритм дослідження автоматичних систем з управляючими логічними пристроями, який враховує вплив неконтрольованих параметричних збурень системи;

- розроблена комп'ютерна програма для моделювання нелінійних систем з логічними управляючими пристроями, з метою визначення областей стійкості таких систем при врахуванні параметричних збурень на етапах проектування, експлуатації та діагностування.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено на Південно-Західній залізниці (впровадженні моделі, які дозволяють підвищити активність дослідження стійкості та оцінювання показників якості систем автоматичного управління з логічними управляючими пристроями) та у навчальний процес кафедри комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету (розроблений метод моделювання автоматичних систем з ЛУП). Впровадження результатів дисертаційних досліджень підтверджено відповідними актами.

***Особистий внесок здобувача.*** Всі основні результати дисертаційної роботи були отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належать наступні результати: метод оцінки стійкості та чутливості нелінійних інформаційно-вимірювальних систем із змінними параметрами при впливі параметричних збурень [6], технологія для моделювання нелінійних систем з логічними управляючими пристроями [2], отримані аналітичні залежності для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічного управляючого пристрою в системах з логічними керувальними пристроями в умовах параметричних збурень [8], метод аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями в системах пожежогасіння на залізничному транспорті [9], проведено дослідження стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі параметричних збурень [4].

***Апробація результатів дисертації.*** Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 7 науково-технічних конференціях, а саме: на IX Міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології», м. Київ, 2007р., XIV (2007р., м. Севастополь) і XVI (2009р., м. Чернівці) Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика», Міжнародній науково-технічній конференції «КУСС-2010», м. Вінниця, 2010 р., I і II Всеукраїнська науково-практична конференція «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології», м. Київ, III Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», м. Вінниця, 2012р., та на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області, Вінниця 2009-2012р.

***Публікації.*** Результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 друкованих працях, в тому числі 5 статей, 4 з яких надруковано у фахових виданнях, 6 робіт опубліковані в збірниках матеріалів конференцій, отримано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

***Структура роботи та її обсяг.*** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний зміст викладено на 139 сторінках друкованого тексту, містить 38 рисунків, 6 таблиць. Список використаних джерел включає 135 найменувань. Загальний обсяг 185 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність моделювання автоматичних систем управління з

логічними управляючими пристроями, зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовану мету та завдання досліджень, охарактеризовано науково новизну та практичне значення одержаних результатів, надано інформацію про їх впровадження, апробацію та публікації.

У **першому розділі** здійснено аналіз сучасного стану моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. Показано необхідність застосування логічних пристроїв різних типів в сучасних системах управління, розглянуто особливості функціонування систем з логічними управляючими пристроями, які здійснюють переробку вхідної інформації в управляючі команди у відповідності з заданим логічним алгоритмом.

Так, в автоматизованих системах управління складними технологічними процесами комплекс управляючих логічних пристроїв здійснює послідовність логічних операцій управління (переключень), захисту та сигналізації. В цих системах основними функціями управляючих логічних пристроїв є контроль ходу процесу и стану обладнання; управління виконавчими механізмами в режимах пуску, зупинок, зміни навантаження, включення регуляторів, розпізнавання аварійних ситуацій; сигналізація про них та їх попередження. Отже більшість таких систем на протязі довготривалого часу змінюють (або підтримують незмінними) певні фізичні величини (координати рухомого об'єкту, швидкість руху, електричну напругу, частоту, температуру, тиск, гучність звуку, тощо) в заданому керуючому процесі. До таких систем можна віднести автоматичні регулятори, системи спостереження, автопілоти, системи управління курсом, тощо. Особливістю структури таких систем є наявність зворотного зв'язку, який дозволяє інформацію про стан об'єкту управління передати в пристрій керування. Тобто системи, що розглядаються в даній роботі, відносяться до класу замкнених нелінійних систем, які включають релейні системи та системи з логічними управляючими пристроями.

Викладене вище і визначило зміст наукових досліджень, вказаний в задачах досліджень.

У **другому розділі** здійснено розробку методу моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при неконтрольованих змінах їх параметрів.

Проведений в роботі аналіз структурних особливостей систем з ЛУП дозволив побудувати узагальнену структурну схему системи (Рис. 1), яка охоплює клас систем, що розглядається в роботі. Характерною особливістю таких систем є наявність декількох давачів, релейних елементів з гістерезисом та ЛУП, який формує управляючий вплив.

В роботі розглядалась система з двома давачами, причому при наявності в релейних елементах гістерезису, вихідні їх сигнали  $u_x$  та  $u_y$  визначаються не лише значеннями вхідних сигналів  $x, y$ , але і знаком їх похідних  $\dot{x}, \dot{y}$ . Алгоритм, який реалізується логічним управляючим пристроєм, в роботі представлений наступною логічною функцією:

$$U = \begin{cases} U_1 \equiv [(U_y^* \wedge U_x) \vee U_y]; \\ U_2 \equiv [U_x \vee (U_y \wedge U^*_x)]; \\ 0 \equiv [\bar{U}_x \wedge \bar{U}_y \wedge \bar{U}^*_x \wedge \bar{U}^*_y]; \\ -U_2 \equiv [U^*_x \vee (U_x \wedge U^*_y)]; \\ -U_1 \equiv [(U_y \wedge U^*_x) \vee U^*_y]. \end{cases} \quad (1)$$

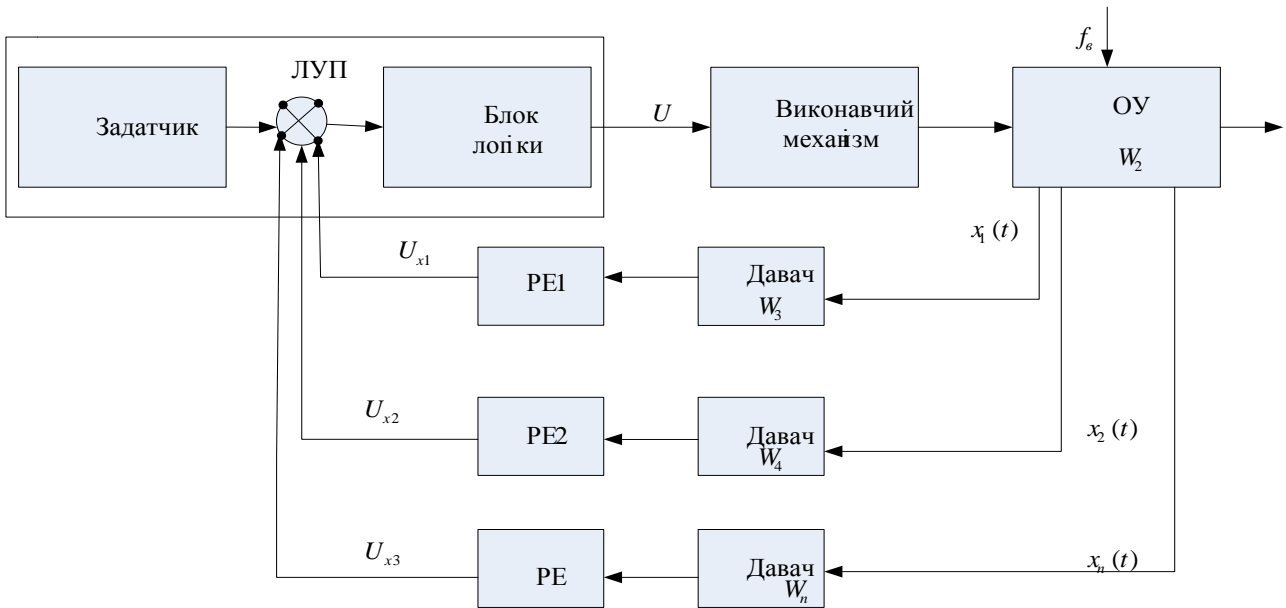


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема автоматичної системи з ЛУП

Задача моделювання такої системи зводиться до побудови передаточних характеристик лінійної та нелінійної частин системи. Лінеаризоване рівняння нелінійної частини з логічним управляючим пристроєм та релейними елементами без урахування параметричних збурень в роботі розглядалась, як:

$$F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) = \left( \frac{c_{10}}{A_y} y + \frac{a_{10}}{A_y \omega} \cdot \dot{y} \right) + \left( \frac{b_{01}}{A_x} x + \frac{a_{01}}{A_y \omega} \dot{x} \right), \quad (2)$$

де  $A_x$ ,  $A_y$  - амплітуди вхідних сигналів  $x$  і  $y$ , відповідно,  $\omega$  - частота вхідних сигналів,  $\tilde{n}_{10}$ ,  $a_{10}$ ,  $b_{01}$ ,  $a_{01}$  - коефіцієнти гармонічної лінеаризації.

В роботі отримані математичні співвідношення для знаходження  $c_{10}$ ,  $a_{10}$ ,  $b_{01}$ ,  $a_{01}$  при умові, що параметри релейних елементів (рівень вихідного сигналу реле і ширина зони нечутливості) в умовах параметричних збурень змінюються за лінійними законами. При цьому значення відповідних коефіцієнтів визначені за допомогою розкладу логічної функції (1), що описує логічний управляючий пристрій з релейними елементами, виду:

$$a_{10} = \frac{1}{2\pi^2} \iint_{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \cos \Psi_y d\Psi_y d\Psi_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \cos \Psi_y d\Psi_y, \quad (3)$$

$$a_{01} = \frac{1}{2\pi^2} \iint_{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \cos \Psi_x d\Psi_y d\Psi_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \cos \Psi_x d\Psi_x, \quad (4)$$

$$b_{01} = \frac{1}{2\pi^2} \iint_{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \sin \Psi_x d\Psi_y d\Psi_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \sin \Psi_x d\Psi_x \quad (5)$$

$$c_{10} = \frac{1}{2\pi^2} \iint_{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \sin \Psi_y d\Psi_y d\Psi_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}) \sin \Psi_y d\Psi_y, \quad (6)$$

де  $\Psi_y = \omega t$ ;  $\Psi_x = \omega t + \varphi$ , а  $\omega$  - частота сигналу  $Y(t)$ ,  $\varphi$  - зсув фаз між сигналами  $x(t)$ ,  $y(t)$ .

Тоді для визначення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації рівняння ЛУП з двома релейними елементами, з урахуванням неконтрольованих параметричних збурень отримані математичні співвідношення для коефіцієнтів,  $c_{10}$ ,  $a_{01}$ :

$$\begin{aligned}
a_{10}(U_1, b_x, U_2, b_y, A_x, A_y, \omega) = & U_{20} \frac{b_y}{A_y} \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ \frac{b_y}{A_y} (\arcsin \frac{b_y}{A_y}) + \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2} - 1 \right] + U_{10} (\sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} - \cos \varphi \frac{b_x}{A_x}) - \\
& - U_{10} \frac{b_y}{A_y} \pm \frac{U_1}{\omega} [(\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) (\sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} - \cos \varphi \frac{b_x}{A_x}) + \cos \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi - (\arcsin \frac{b_y}{A_y}) (\frac{b_y}{A_y}) - \\
& - \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2}] - U_{20} \frac{b_y}{A_y} - U_{20} (\sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi) \pm \frac{U_2}{\omega} [(\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \frac{b_y}{A_y} - \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2} - \\
& - (\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) (\sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi) - (\sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi)] \pm \frac{U_2}{\omega} [-(\pi + \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \frac{b_y}{A_y} - \\
& - \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2} - (\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \frac{b_y}{A_y} + \sqrt{1 + (\frac{b_y}{A_y})^2}] + U_{10} (\sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi) - U_{10} \frac{b_y}{A_y} \pm \\
& \pm \frac{U_1}{\omega} [(2\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) (\frac{b_x}{A_x} \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2}) + (\cos \varphi \sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi) + (\pi + \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \frac{b_y}{A_y} + \\
& + \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2}] + U_{20} \frac{b_x}{A_x} - U_{20} (\sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi) \pm \frac{U_2}{\omega} [-(2\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \frac{b_y}{A_y} + \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2} - \\
& - (2\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) (\sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi) + (\sqrt{1 - (\frac{b_x}{A_x})^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi)] + U_{20} \frac{b_y}{A_y} \pm \frac{U_2}{\omega} [1 + \\
& + (2\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) (\frac{b_y}{A_y}) - \sqrt{1 - (\frac{b_y}{A_y})^2}].
\end{aligned} \tag{7}$$

та для коефіцієнтів  $c_{10}$ ,  $b_{01}$ :



$$\begin{aligned}
c_{10} = & -U_{20} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} + U_{20} \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ -\arcsin\left(\frac{b_y}{A_y}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} + \left(\frac{b_y}{A_y}\right) \right] + \\
& + U_{10} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) + U_{10} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} \pm \frac{U_1}{\omega} \left[ (\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) + \right. \\
& + \left. \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi \right) + \left( \arcsin \frac{b_y}{A_y} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - \frac{b_y}{A_y} \right) \right] + U_{20} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - U_{20} \left( \cos \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} + \right. \\
& + \left. \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ (\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} + \frac{b_y}{A_y} + (\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) - \right. \\
& - \left. \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi \right) \right] \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ -2 \frac{b_y}{A_y} + 2 \left( \arcsin \frac{b_y}{A_y} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} \right] + U_{10} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) + \\
& + U_{10} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} \pm \frac{U_{10}}{\omega} \left[ -(2\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) - \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi \right) - \right. \\
& - \left. \left( \pi + \arcsin \frac{b_y}{A_y} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - \frac{b_y}{A_y} \right] + U_{20} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - U_{20} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) \pm \\
& \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ -(2\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - \frac{b_y}{A_y} + (2\pi - \varphi + \arcsin \frac{b_x}{A_x}) \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \cos \varphi + \frac{b_x}{A_x} \sin \varphi \right) + \right. \\
& + \left. \left( \sqrt{1 - \left(\frac{b_x}{A_x}\right)^2} \sin \varphi - \frac{b_x}{A_x} \cos \varphi \right) \right] - U_{20} + U_{20} \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} \pm \frac{U_2}{\omega} \left[ (-2\pi) + (2\pi - \arcsin \frac{b_y}{A_y}) \sqrt{1 - \left(\frac{b_y}{A_y}\right)^2} - \frac{b_y}{A_y} \right].
\end{aligned} \tag{8}$$

В роботі отримані аналітичні залежності для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічного управляючого пристрою, які на відміну від існуючих, враховують вплив неконтрольованих параметричних збурень на автоматичні системи з логічними управляючими пристроями, що дозволяє аналітично оцінити стійкість таких систем в просторі параметрів. З урахуванням отриманих в роботі аналітичних залежностей для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічного управляючого пристрою отриманий вираз для лінеаризованого рівняння ЛУП (2), який дозволяє вирішити задачу аналізу автоматичних систем з ЛУП та визначити умови її стійкості з врахуванням впливу неконтрольованих параметричних збурень. Для цього в роботі запропонований загальний підхід до аналізу впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, що відбуваються за рахунок параметричних завод.

**У третьому розділі** розроблені математичні моделі аналізу впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями.

Для системи з двохходовим ЛУП визначено передаточну функцію та отримано рівняння, яке дозволило визначити амплітуду  $A_y$  і частоту  $\omega$  періодичного рішення для відповідного діапазону зміни зсуву фаз  $\varphi$ , виведено аналітичні вирази для визначення амплітуди та частоти автоколивань, оцінено вплив параметрів системи на автоколивання і визначено можливість побудови границь стійкості системи в площинах параметрів.

Так, для автоматичної системи з двохходовим ЛУП, двома давачами та двома релейними елементами (рис.2), характеристичне рівняння якої має вигляд:

$$p(T_0 p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k_0 k_1 k_2 k_3 \left( q + \frac{q' p}{\omega} \right) = 0, \tag{9}$$

отримані аналітичні співвідношення дійсної та уявної частини в залежності від параметрів системи  $A_y, \omega, b_y, b_x, U_1, U_2$  виду:

$$X(A_y, \omega, b_y, b_x, U_1, U_2) = [T_0 T_1 (T_2 + T_3) + (T_0 - T_1) T_2 T_3] \omega^4 - [(T_0 - T_1) - (T_2 + T_3)] \omega^2 + K_0 K_1 K_2 K_3 \left\{ \frac{2}{\pi A_y} \left[ 2(U_1 - U_2) \sqrt{1 - \frac{b_y^2}{A_y^2}} + U_2 \cos \left[ \arctg \frac{-\omega^3 T_2 T_3 - \omega}{-\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)} - \arctg \omega T_1 \right] \right] \right\} \quad (10)$$

$$Y(A_y, \omega, b_y, b_x, U_1, U_2) = T_0 T_1 T_2 T_3 \omega^5 [T_0 T_1 + (T_0 - T_1)(T_2 + T_3) - T_2 T_3] \omega^3 + K_0 K_1 K_2 K_3 \left\{ \frac{2U_2}{\pi A_y} \left( \frac{b_y}{A_y} + \sin \left[ \arctg \frac{-\omega^3 T_2 T_3 - \omega}{-\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)} - \arctg \omega T_1 \right] \right) \right\}. \quad (11)$$

З метою спрощення отриманих виразів для подальшого дослідження в роботі запропонований метод оцінки впливу параметричних збурень на стійкість системи, що досліджується, який дозволив за допомогою апроксимації отримати вирази для дійсної та уявної частини характеристичного поліному  $X(\omega, A, b)$  та  $Y(\omega, A, b)$  у вигляді поліномів виду:

$$X(\omega, A, b) = c_0 + c_1 \omega + c_2 A + c_3 b + c_4 Ab, \quad Y(\omega, A, b) = d_0 + d_1 \omega + d_2 A + d_3 b + d_4 Ab.$$

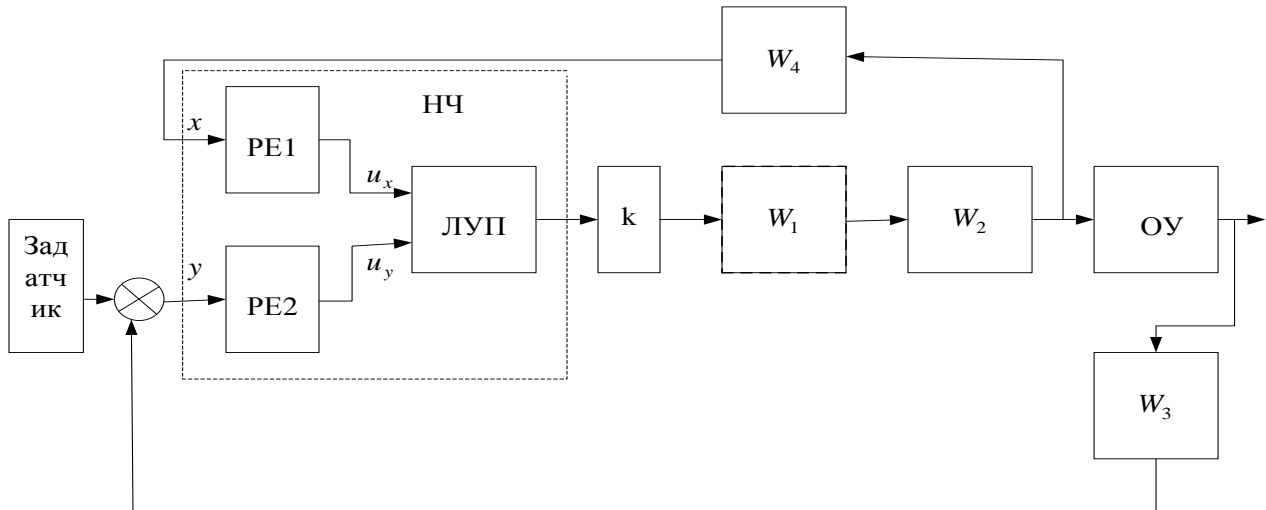


Рисунок 2 – Структурна схема автоматичної системи з двохходовим ЛУП

Метод оснований на двох алгоритмах: алгоритму визначення параметрів автоколивачів та алгоритму оцінки впливу параметричних збурень в системі на параметри автоколивачів.

Алгоритм аналізу стійкості системи включає такі етапи:

1. Оцінити значення параметрів  $\omega, A, b_x, b_y$  при яких в системі спостерігатимуться автоколивання.

2. Побудувати систему лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів поліному  $\{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4\}$  та  $\{d_0, d_1, d_2, d_3, d_4\}$ , що шукаються.

3. Виконати апроксимацію дійсної та уявної частини характеристичного поліному методом найменших квадратів.

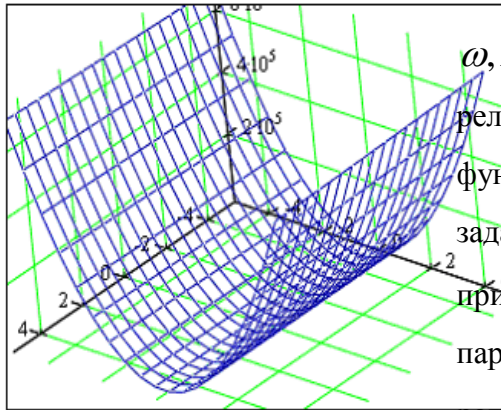
4. Одержана спрощена модель дійсної та уявної частини характеристичного поліному, дає можливість знайти параметри автоколивачів  $\omega, A$  та вплив на них параметрів релейних елементів  $b_x, b_y$ .

5. Побудувати цільову функцію, що представляє собою довжину вектора  $L$ , проведеного з початку координат комплексної площини в точку на годографі Михайлова, координати якої визначаються за умовою  $L = \sqrt{X^2 + Y^2}$ , при цьому межі стійкості або коливального

режиму будуть відповідати  $L=0$ , а в усіх інших випадках  $-L>0$ . Для спрощення дослідження використаємо цільову функцію виду  $F = L^2 = (X^2 + Y^2)$ . Ця функція додатна та приймає нульові значення при таких  $\omega, A, b_x, b_y$ , які відповідають коливальному режиму роботи системи.

6. Провести оптимізацію цільової функції одним з градієнтних методів та чисельно визначити  $\omega$  та  $A$  автоколивань

В результаті отримана лінеаризована модель дійсної та уявної частини характеристичного поліному частотної області для побудови годографа Михайлова, які надали можливість аналітично знайти параметри автоколивань  $\omega, A$  та вплив на них параметрів релейного елемента.



При визначенні параметрів автоколивань  $\omega, A$  та аналізу впливу на них параметрів релейного елемента за допомогою цільової функції  $F$  розв'язувалися дві задачі: для заданих параметрів системи знайти такі  $\omega, A$ , при яких  $F=0$  та визначити залежності параметрів автоколивань  $\omega, A$  від параметрів релейних елементів. При розв'язанні цих задач

Рисунок 3 – Цільова функція  $F = L^2 = (X^2 + Y^2)$  для визначення амплітуди та частоти авто-коливань

була проведена мінімізація цільової функції  $F$  (рисунок 3) градієнтним методом найшвидшого спуску в середовищі MathCad, в результаті якого були отримані значення

амплітуди автоколивань  $A_y = 0,0077$ , частота автоколивань  $\omega_y = 0,009$ .

Для спрощення процедури дослідження стійкості нелінійних систем та отримання областей зміни параметрів нелінійних елементів системи (релейних елементів та логічного пристрою), у яких зберігається стійкість всієї системи в цілому, в роботі розглядалася можливість розширення області використання методології аналізу поведінки нелінійних нестационарних систем у просторі приросту параметрів з кусково-неперервними векторами змінних стану проф.

Юхимчука С. В., яка дозволяє на основі узагальненого методу описуючих функцій визначити границі областей стійкості систем у просторі приросту їх параметрів. Знання границь областей дає можливість визначити області зміни первинних параметрів систем, у яких зберігаються властивість їх стійкості.

В роботі вдосконалено метод проф. Юхимчука С. В. в напрямку розширення області застосування на системи з логічними управляючими пристроями, який дозволяє здійснити оцінювання чутливості вихідного сигналу до неконтрольованих збурень первинних параметрів, що дає можливість проектувати системи інваріантні до таких збурень. Даний метод передбачає наступні кроки:

1. Побудувати нелінійне диференціальне рівняння, яке описує динаміку, роботи системи, що досліджується.
2. Визначити вид функцій чутливості.
3. Перетворити диференціальне рівняння, яке описує динаміку системи, що досліджується, відносно зміни приростів параметрів системи з урахуванням параметричних збурень.
4. Розв'язати отриману систему диференціальних рівнянь в просторі параметрів системи.

5. Дослідити та проаналізувати чутливість системи, що досліджується за допомогою функцій чутливості

6. Побудувати аналоги фазових траєкторій та визначити умови стійкості системи при впливі параметричних збурень.

7. Дослідити стійкість системи в просторі параметрів з використанням законів зміни параметрів.

Дослідження запропонованого в роботі методу аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями проводилися на прикладі системи з дво- входовим ЛУП, структурна схема якої представлена на рисунку 2, для якої в роботі отримано нелінійне нестационарне диференціальне рівняння п'ятого порядку відносно вихідного сигналу  $y$ :

$$\begin{aligned} N_5 \frac{d^5 x(t)}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 x(t)}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 x(t)}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - \frac{dx(t)}{dt} + \\ K a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) \cdot \frac{dx(t)}{dt} + a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) x(t) = \\ = a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) \frac{dy(t)}{dt} + a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) y(t), \end{aligned} \quad (12)$$

де  $N_5 = T_0 T_1 T_2 T_3$ ;  $N_4 = T_0 T_1 (T_2 + T_3) + (T_0 - T_1) T_2 T_3$ ;  $N_3 = T_0 T_1 + (T_0 - T_1) (T_2 + T_3)$ ;

$N_2 = (T_0 - T_1) - (T_1 + T_3)$ ;  $K = K_0 K_1 K_2 K_3$ ,

$a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)$  та  $a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)$  - функції релейних елементів з заданою статичною характеристикою типу гістерезис, отримані в роботі з рівняння гармонічної лінеаризації, мають вигляд:

$$a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) = \left( \frac{2KU_2}{\pi A_y^2 \omega} - \frac{2b_x U_2 \cos \varphi}{\pi A_y^2 M \omega} + \sqrt{1 - \frac{b_x^2}{A_y^2 M^2} \frac{\sin \varphi}{\omega} - 1} \right) \frac{dx(t)}{dt}; \quad (13)$$

$$a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) = \frac{4K(U_1 - U_2)}{\pi A_y} \sqrt{1 - \frac{b_y^2}{A_y^2}} + \frac{2U_2}{\pi A_y} \left( \frac{b_x}{A_y M} \sin \varphi + \sqrt{1 - \frac{b_x^2}{A_y^2 M^2} \cos \varphi} \right) x(t), \quad (14)$$

де  $M = \frac{K_1 \omega}{K_2 K_3} \sqrt{\frac{\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)^2 + (1 + \omega^2 T_2 T_3^2)}{1 + \omega^2 T_1^2}}$ ,  $\varphi = \arctg \frac{-\omega^3 T_2 T_3 - \omega}{-\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)} - \arctg \omega T_1$

Для того, щоб оцінити вплив зміни параметрів релейних елементів на вихідний сигнал системи, що досліджувалася, в роботі виконаний перехід від опису динаміки системи (12) до опису динаміки системи у просторі приростів параметрів та отримані функції чутливості вихідного сигналу системи до зміни вихідних сигналів першого релейного елемента  $U_1$ ,  $U_2$  виду:

$$\begin{aligned} N_5 \frac{d^5 \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^2} - \frac{d \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt} + K \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{d \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt} + \\ + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right) = \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{dy(t)}{dt} + \\ + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} y(t), \end{aligned} \quad (15)$$

та при позначенні  $\left( \frac{\partial x}{\partial b} \right) = U_{xb}$  вираз (15) приймає вигляд:

$$\begin{aligned}
& N_5 \frac{d^5 U_{xb}}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 U_{xb}}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 U_{xb}}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 U_{xb}}{dt^2} + \frac{dU_{xb}}{dt} + \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{dU_{xb}}{dt} + \\
& + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} U_{xb} = \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{dy(t)}{dt} + \\
& + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} y(t).
\end{aligned} \tag{16}$$

Аналогічно рівнянням (15), (16) в роботі були отримані аналітичні співвідношення для функцій чутливості вихідного сигналу до зміни параметрів другого релейного елемента  $b_y$  та  $U_2$ , спільне розв'язання яких з (15),(16) в середовищі MathCad дозволило отримати залежності зміни вихідного сигналу і відповідних функцій чутливості та аналогів фазових траєкторій, графіки яких наведені на рисунках 4.

Дослідження в роботі проводилися відносно зміни приростів параметрів системи  $t$ ,  $\omega$ ,  $A_y$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $b_x$ ,  $b_y$ , при різних значеннях цих змінних на інтервалі  $[0.1, 100]$  з кроком 0.1 з урахуванням неконтрольованих параметричних збурень в системі, початкові значення  $\omega = 0,01$ ,  $A_y = 1,2 \cdot 10^{-2}$ ,  $U_1 = U_2 = 1$ . Як показали результати моделювання та дослідження, зміна параметрів  $b_y, U_2$  суттєво впливає на характер зміни функції чутливості вихідного сигналу, що дозволило за допомогою умови асимптотичної стійкості та критерію Гурвіца визначити область стійкості системи з двоходовим ЛУП в області параметрів  $U_2(t)$ ,  $U_1(t)$  та  $b_y(t)$ ,  $b_x(t)$ , що представлена на рисунку 5.

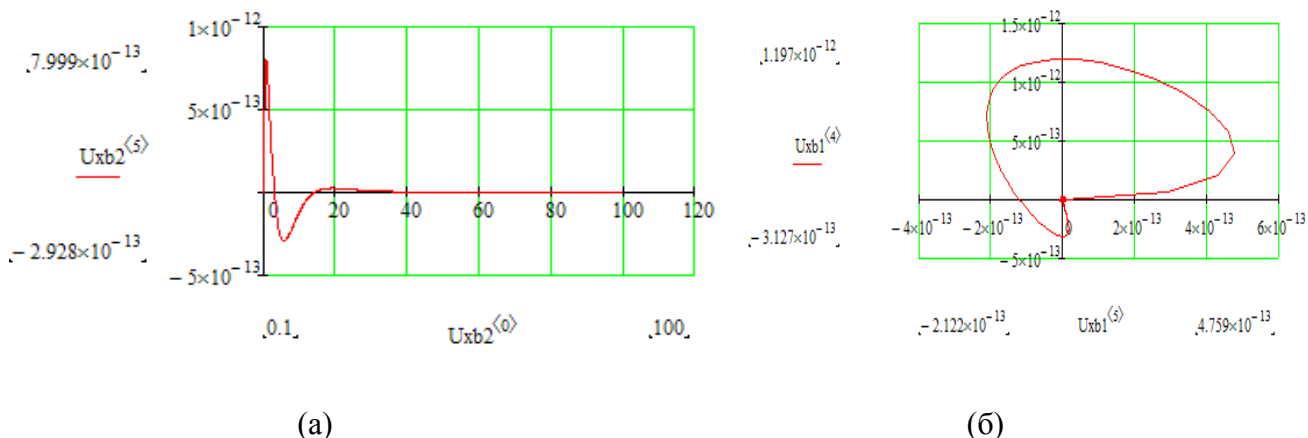


Рисунок 4 - Графіки зміни функції чутливості вихідного сигналу до зміни значень  $b_y$  (а) та фазової траєкторії (б) при  $\omega = 0,01$ ,  $A_y = 1,2 \cdot 10^{-2}$ ,  $b_x = 10^{-2}$ ,  $U_1 = 1, U_2 = 0,7$  (система стійка)

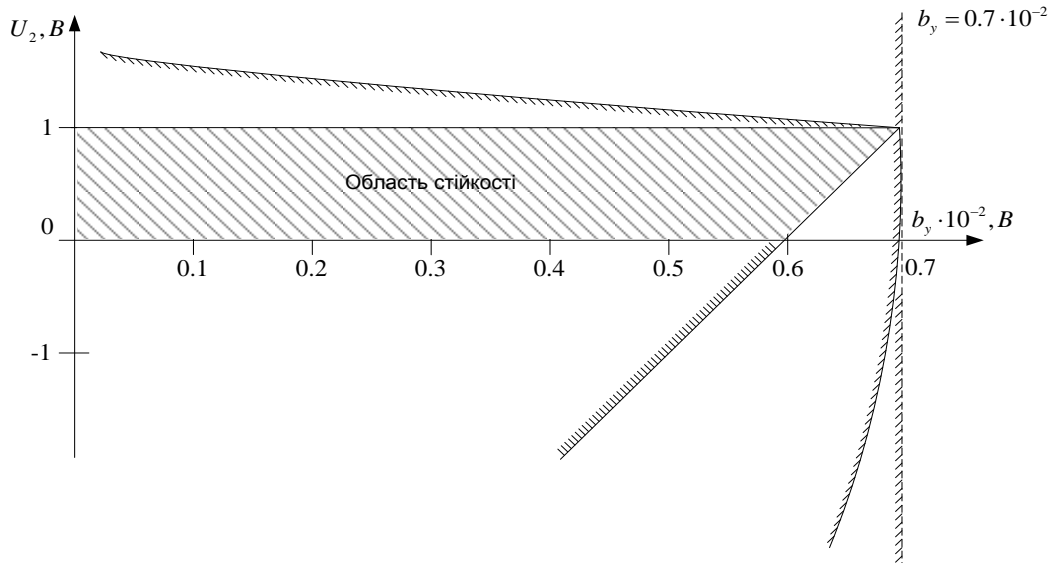


Рисунок 5 - Область стійкості автоматичної системи з двоходовим ЛУП в просторі параметрів  $U_2, b_y$

Для дослідження адекватності отриманих в роботі математичних моделей параметрів автоколивальних був використаний пакет програм для моделювання нелінійних систем Simulink. Структура імітаційної моделі показана на рис.6.

Порівняння результатів аналітичного моделювання запропонованим методом і імітаційної моделі показало, що максимальна похибка визначення границь області стійкості складає 9,8%.

У четвертому розділі розроблена методика моделювання та дослідження автоматичних систем з ЛУП на прикладі автоматичної системи управління пожежогасінням, що використовується на залізничному транспорті.

Розроблений алгоритм дослідження нестационарних систем з ЛУП, який, на відміну від існуючих, дозволяє проводити математичне моделювання таких систем, зокрема визначати параметри автоколивальних в умовах неконтрольованих параметричних збурень. Розроблена комп'ютерна програма для моделювання нелінійних систем з логічними управляючими пристроями, з метою визначення областей стійкості таких систем при врахуванні параметричних збурень на етапах проектування, експлуатації та діагностування.

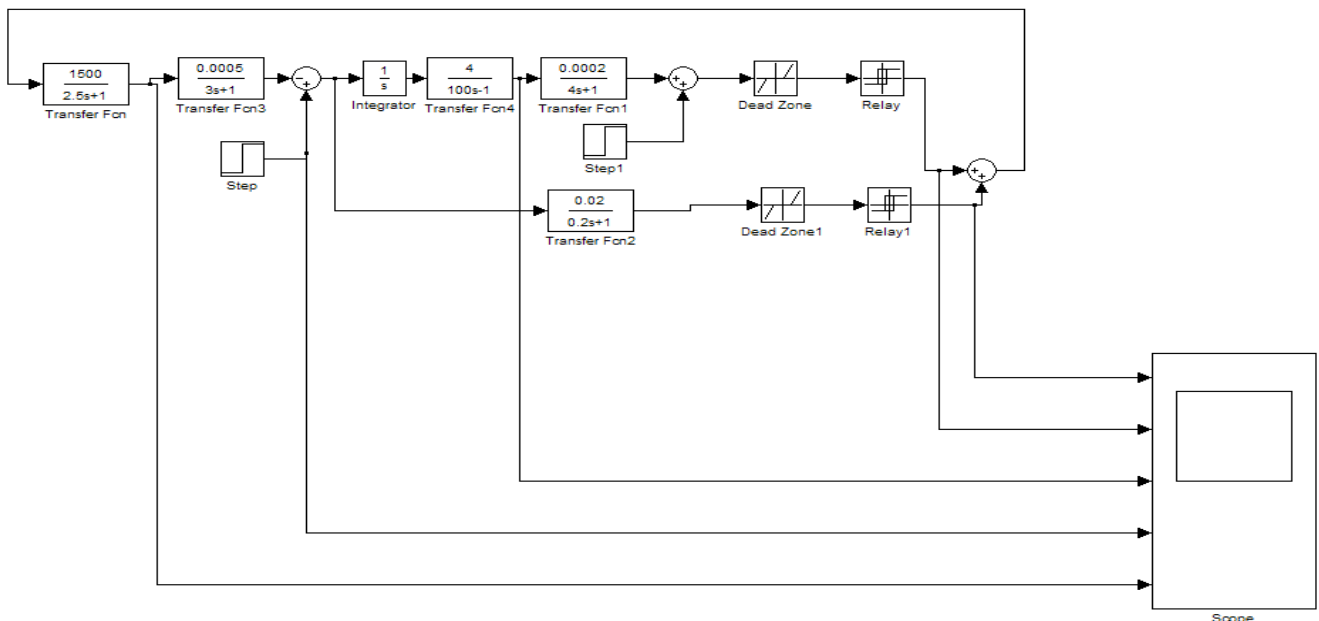


Рисунок 6 - Модель автоматичної системи з двоходовим ЛУП в середовищі Simulink, яка використовувалась для оцінки адекватності отриманих моделей

Результати дисертаційних досліджень впроваджено на Південно-Західній залізниці та у навчальний процес кафедри комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету. Проведено дослідження умов стійкості автоматичної системи управління пожежогасінням на залізничному транспорті з використанням розроблених в роботі методів та моделей, яке підтвердило можливість використання розроблених математичних моделей автоколивачів при впливі неконтрольованих параметричних збурень для визначення границі стійкості системи, що дозволяє на етапах діагностування та налагодження збільшити точність настройки параметрів елементів системи з 20% до 8% в порівнянні з методами, що використовувалися раніше.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу забезпечення стійкого функціонування систем з логічними управляючими пристроями в умовах неконтрольованих змін їх параметрів на основі нових та удосконалених методів моделювання таких систем.

У дисертаційній роботі одержані такі основні наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз сучасних методів дослідження систем автоматичного керування з логічними управляючими пристроями, дозволив визначити шляхи розв'язку трьох основних задач аналізу автоматичних систем з ЛУП, - умови існування автоколивачів, визначення параметрів та умов забезпечення їх стійкості. Аналіз існуючих підходів до моделювання систем з логічними управляючими пристроями показав, що для моделювання такого класу систем широко використовуються методи гармонічної лінеаризації, які, на відміну від відомих підходів, базуються на використанні подвійних рядів Фур'є.

2. Розроблено метод моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який на відміну від існуючих дозволяє враховувати вплив неконтрольованих параметричних збурень, що дає можливість отримати аналітичну модель логічного управляючого пристрою меншої складності, придатні для застосування в автоматизованих системах проектування та діагностування відповідного класу систем.

3. Отримані аналітичні залежності для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічних управляючих пристроїв при впливі на них параметричних збурень на основі розкладу логічної функції, що описує логічний управляючий пристрій з релейними перетворювачами сигналів, у подвійний ряд Фур'є та співвідношень, які визначаються за умов, що параметри релейних перетворювачів змінюються за лінійними законами під дією неконтрольованих параметричних збурень, що дозволяє аналітично оцінити стійкість таких систем в просторі параметрів та розширити функціональні можливості моделювання відповідного класу систем.

4. Розроблений метод оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який відрізняється аналітичною формою подання області стійкості таких систем, що дає можливість визначити границі стійкості і параметри автоколивачів. На основі запропонованого методу розроблені математичні моделі для визначення параметрів автоколивачів, які дозволяють враховувати змінення первинних параметрів автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі на них неконтрольованих параметричних збурень.

5. Вдосконалено метод аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями, який дозволяє здійснити оцінювання чутливості вихідного сигналу до неконтрольованих збурень первинних параметрів, що дає можливість визначити границі областей стійкості систем у просторі приросту їх параметрів та проектувати системи інваріантні до неконтрольованих параметричних збурень. Проведений аналіз стійкості на прикладі системи з двоходовим ЛУП від параметрів системи на основі вдосконаленого в

роботі відомого підходу для нелінійних систем з використанням методу апроксимації дійсної та уявної частини характеристичного поліному показав, що запропонований підхід дозволяє суттєво спростити процедуру аналізу стійкості нелінійних систем за допомогою годографа Михайлова.

6. Для перевірки адекватності отриманих в роботі математичних моделей та методів був використаний пакет програм для моделювання систем Simulink, в середовище якого проводилося моделювання динаміки автоматичної системи з двохходовим ЛУП, аналіз режимів автоколивальності та визначення значень параметрів автоколивальності, та умов стійкості системи. Результати моделювання підтвердили результати, отримані в роботі аналітично, максимальна відносна похибка моделювання складає  $\delta = 9.8\%$ .

7. Розроблена методика моделювання та дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями на прикладі автоматичної системи управління пожежогасінням, що використовується на залізничному транспорті.

8. Розроблений алгоритм дослідження нестационарних систем з управляючими логічними пристроями, який, на відміну від існуючих, дозволяє проводити математичне моделювання таких систем, зокрема визначати параметри автоколивальності при умові впливу на системи, що розглядаються, неконтрольованих параметричних збурень.

9. Розроблена комп'ютерна програма для моделювання нелінійних систем з логічними управляючими пристроями з метою визначення областей стійкості таких систем при врахуванні параметричних збурень на етапах проектування, експлуатації та діагностування.

10. Результати дисертаційних досліджень впроваджено на Південно-Західній залізниці та у навчальний процес кафедри комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету. Впровадження результатів дисертаційних досліджень підтверджено відповідними актами. Дослідження зміни параметрів автоколивальності при впливі неконтрольованих параметричних збурень з використанням розроблених в роботі методів та моделей системи управління пожежогасінням на залізничному транспорті підтвердило можливість використання розроблених математичних моделей автоколивальності при впливі параметричних збурень для визначення границі стійкості системи при зміні значень параметрів релейних елементів. Аналіз показав, що розроблена в даній роботі методика суттєво спрощує процес моделювання таких систем та дозволяє отримати залежності стійкості та параметрів автоколивальності від параметричних збурень в системі, що дозволяє на етапах діагностування та налагодження збільшити точність настройки параметрів елементів системи з 20% до 8% в порівнянні з методами, що використовувалися раніше, та в процесі експлуатації системи прогнозувати її подальшу працездатність.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Юхимчук-Войтко М. С. Гармонічна лінеаризація САУ, що керується кінцевим автоматом під час дії параметричних збурень [Електронний ресурс] // М. С. Юхимчук-Войтко // Наукові праці ВНТУ.- 2009.- №3.- Режим доступу: [http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-3/2009-3.files/uk/09msyopp\\_ua.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-3/2009-3.files/uk/09msyopp_ua.pdf), вільний.- Загол. з екрана.- Мова укр.
2. Юхимчук М. С. Інформаційна технологія для моделювання поведінки нелінійних систем з логічними управляючими пристроями / М. С. Юхимчук, С.В. Юхимчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2009. - №2. - С. 122-127.
3. Юхимчук М. С. Моделювання поведінки автоматичних систем захисту в умовах впливу параметричних збурень / М. С. Юхимчук. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2011. - №4.- С. 137-142. ISSN 1997-9266.
4. Юхимчук М.С. Метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі параметричних збурень / М. С. Юхимчук, С. М. Москвіна. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. -2012. - №4.- С. 155-162. ISSN 1997-9266.
5. Юхимчук М. С. Визначення областей робастної стійкості автоматичних систем із логічними управляючими пристроями / М. С. Юхимчук // Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної



конференції” Системний аналіз та інформаційні технології ”, 15-19 травня 2007: тези доповіді.-Київ. – С. 89-90.

6. Юхимчук М. С. Оцінка стійкості та чутливості нелінійних інформаційно-вимірювальних систем із змінними параметрами/ М. С. Юхимчук, С. В. Юхимчук// 14 Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика 2007), 17-22 вересня 2007: тези доповіді. – Севастополь. – С.56-58. ISBN 978-966-641-210-5.

7. Юхимчук-Войтко М. С. Визначення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації систем із логічними управляючими пристроями при впливі параметричних збурень/ М. С. Юхимчук-Войтко// 16 Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика 2009), 22-25 вересня 2009: тези доповіді Чернівці, 2009.- С. 237-238.

8. Юхимчук М. С. Гармонічна лінеаризація в системах з логічними керувальними пристроями в умовах параметричних збурень/ М. С. Юхимчук, С. М. Москвіна. Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології-2011 I Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ-2011 20-21 квітня 2011.-С. 41.

9. Юхимчук М. С. Метод аналізу стійкості САУ з логічними управляючими пристроями в системах пожежогасінням в залізничному транспорті/ М. С. Юхимчук, С. М. Москвіна. Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології-2012 II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ-2012, м. Київ, 19-20 квітня 2012 р.С.29-30.

10. Юхимчук М.С. Розробка структури засобу моделювання для дослідження поведінки автоматичних систем з управляючими логічними пристроями // М. С. Юхимчук. Тези доповідей третьої міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія», м. Вінниця, 29-31 травня 2012 р.- Вінниця: ВНТУ, 2012.-С. 276-278. ISBN 978-966-641-465-9.

11. Юхимчук М. С. Інформаційна технологія для моделювання поведінки нелінійних систем з логічними управляючими пристроями/ М. С. Юхимчук. //Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. - 2010. - №1. - С. 62-64.

12. Юхимчук М. С. Комп’ютерна програма «Моделювання поведінки нелінійних систем з логічними управляючими пристроями» / М. С. Юхимчук. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір №40168 від 15 вересня 2011 р.

#### АНОТАЦІЯ

Юхимчук М. С. Математичне моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи - Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2012.

Дисертація присвячена розробці методів та моделей для моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. В роботі розроблений метод моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який відрізняється параметричним поданням збурень, що дає можливість отримати аналітичні моделі логічних управляючих пристроїв меншої складності і спростити процес отримання характеристик системи в широкому діапазоні значень збурень. Отримані аналітичні залежності для обчислення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації логічного управляючого пристрою, які на відміну від існуючих, враховують вплив неконтрольованих параметричних збурень, що дозволяє аналітично оцінити стійкість таких систем в просторі параметрів. Для оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями розроблений метод, який відрізняється аналітичною формою подання області стійкості таких систем, що дає можливість визначити границі стійкості і параметри автоколивань. Удосконалено метод аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями, який дозволяє здійснити оцінку чутливості вихідного сигналу до неконтрольованих збурень первинних параметрів, що дає можливість проектувати системи інваріантні до них.

На основі розроблених в роботі моделей та методів запропонована узагальнена методика моделювання та дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями на прикладі автоматичної системи пожежогасіння, що використовується на залізничному транспорті.

Ключові слова: автоматична система управління, логічний управляючий пристрій, релейні елементи, параметричні збурення, метод гармонічної лінеаризації, умови стійкості системи.

#### АННОТАЦІЯ

Юхимчук М. С. Математическое моделирование автоматических систем с логическими управляющими устройствами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2012.

Проведен анализ современного состояния моделирования автоматических систем с логическими управляющими устройствами, особенностей функционирования и моделирования таких систем, а также методов оценки их устойчивости, анализ параметрических возмущений, которые влияют на функционирование автоматических систем с логическими управляющими устройствами. Проведенный анализ современных методов исследования автоматических систем с логическими управляющими устройствами позволил определить пути решения трех основных задач анализа таких систем: условия существования автоколебаний, определение параметров та условий обеспечения их устойчивости.

Разработан метод моделирования автоматических систем с логическими управляющими устройствами в условиях влияния неконтролируемых параметрических возмущений, который позволяет упростить процесс получения характеристик системы в широком диапазоне значений возмущений. Получены аналитические зависимости для вычисления коэффициентов гармонической линейаризации логических управляющих устройств в условиях параметрических возмущений на основе разложения логической функции устройства с релейными преобразователями сигнала, в двойной ряд Фурье, что позволило аналитически оценить устойчивость таких систем в пространстве параметров и расширить функциональные возможности моделирования соответствующего класса систем.

Разработан метод оценки влияния неконтролируемых параметрических возмущений на устойчивость автоматической системы с логическими управляющими устройствами, который отличается аналитической формой представления области устойчивости таких систем, что дало возможность определить границы устойчивости и параметры автоколебаний. Разработаны математические модели для определения параметров автоколебаний, которые позволяют учитывать изменения первичных параметров системы при воздействии на них неконтролируемых возмущений.

Усовершенствованный метод анализа устойчивости автоматических систем с логическими управляющими устройствами, который позволяет оценить чувствительность выходного сигнала к неконтролируемым параметрическим возмущениям первичных параметров системы, что дает возможность определять границы области устойчивости таких систем в пространстве приращения их параметров и проектировать системы, инвариантные к параметрическим возмущениям.

Для проверки адекватности разработанных в работе моделей и методов был использованный пакет программ Simulink, в среде которого проводилось моделирование динамики автоматической системы с двухвходовым логическим управляющим устройством, анализ режимов автоколебаний, определение значений параметров автоколебаний и условий устойчивости системы. Результаты моделирования подтвердили результаты, полученные в работе аналитически, максимальная относительная погрешность моделирования составила 9.8%.

Разработана методика для моделирования и исследования автоматических систем с

логічними управляючими пристроями в умовах впливу неконтрольованих параметричних возмущень на прикладі автоматичної системи управління пожеготушенням, яка використовується на залізничному транспорті.

Розроблена комп'ютерна програма для моделювання та дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями для визначення умов та меж областей стійкості таких систем в умовах впливу неконтрольованих параметричних возмущень на етапах проектування, експлуатації та діагностики.

Ключові слова: автоматична система управління, логічне управляюче пристрій, релейні елементи, параметричні возмущення, метод гармонічної лінеаризації, умови стійкості системи.

#### ABSTRACT

Yukhymchuk M. S. Mathematical Modeling of Automatic systems with logical control devices. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 01.05.02 - mathematical modeling and computational methods. Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, 2012.

The thesis is devoted to development of methods and models for modeling automatic systems with logical control devices. A method for modeling automatic systems with logical control devices was worked out in this paper. The method differs with parametric representation of perturbations. This makes it possible to obtain analytical models of logical control devices with less complexity and simplify characteristics retrieval in a wide perturbation range values.

The analytical expressions for calculating the coefficients of harmonic linearization logic controller were obtained. Expressions take into account the impact of uncontrolled parametric perturbations. This allows evaluating the stability of such systems in the parameter space analytically. The method for assessing an impact of uncontrolled parametric perturbations on the stability of automatic systems with logical control devices was developed. The method differs by presenting the stability region of such systems in analytical form. This makes it possible to determine the boundary of stability region and oscillation parameters. The method for stability analysis of systems with logical control device was improved. The method allows evaluating the sensitivity of the output to uncontrolled primary perturbation parameters.

On the base of developed models and methods the generalized methodics of modeling and analysis of automatic systems with logical control device on example of automatic fire extinguishing systems used in railway transportation was proposed.

Keywords: automatic control system, logic controller, relay elements, parametric perturbation, method of harmonic linearization, stability conditions.

Підписано до друку 20.02.2013 р. Формат  $29,7 \times 42 \frac{1}{4}$

Наклад 100 прим. Зам. № 2013-056

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59