

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Коломієць Світлана Володимирівна

УДК 535.81/818.8

**ДИНАМІКА НАПІВКЛАСИЧНИХ
МОДЕЛЕЙ ОДНОМОДОВИХ ЛАЗЕРІВ
З МОДУЛЯЦІЄЮ ДОБРОТНОСТІ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико – математичних наук

Суми - 2005

Дисертацію є рукопис.

Робота виконана в Сумському національному аграрному університеті, м. Суми.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент
Коваленко Григорій Петрович,
кафедра вищої математики і фізики
Сумського національного аграрного
університету, доцент.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Шматько Олександр Олександрович,
кафедра фізики надвисоких частот
Харківського національного університету
ім. В.Н. Каразіна, професор;

доктор фізико-математичних наук, професор
Чурюмов Геннадій Іванович ,
кафедра фізичних основ електронної техніки
Харківського національного університету
радіоелектроніки, професор.

Провідна установа – Інститут фізики НАН України,
лабораторія лазерної спектроскопії, м. Київ.

Захист відбудеться “28” квітня 2005 року о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова,2, ауд. 304, корпус ЕТ.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розіслано “23” березня 2005 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.С.Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення динаміки процесів, які визначають фізичну картину роботи лазера у різних режимах, стимулюється як розробленням нових методів керування лазерними параметрами, забезпеченням стійкості та стабільності різних режимів генерації, так і подальшим розвитком фізики нелінійних процесів. Нелінійні динамічні режими лазерів привертають увагу з різних причин, серед яких можливість практичного здійснення цих режимів, наявність теоретичних моделей лазерів, які допускають якісне, а іноді і кількісне зіставлення теорії з експериментом, що відкриває можливість поставлення обернених задач динаміки лазерів. Актуальність дослідження обумовлена також прикладними аспектами, оскільки результати можуть бути використані для вивчення загальних закономірностей в поведінці інших нелінійних систем, при вивченні умов і причин виникнення автоколивань, параметричних процесів, динамічного хаосу.

Теоретичне дослідження процесів, що формують регулярну та хаотичну динаміку в лазерних системах, базується на аналізі напівкласичних рівнянь. Різним режимам генерації відповідають різні розв'язки систем нелінійних диференціальних рівнянь, які можуть бути представлені у вигляді траєкторій у фазовому просторі. Особливу роль при аналізі динаміки лазерної системи відіграють точки біфуркації, зокрема, біфуркація народження циклу визначає умови виникнення періодичних коливань.

На сучасному етапі в основу теоретичного аналізу динаміки напівкласичних моделей покладено якісні методи теорії нелінійних коливань, що не дозволяє знайти основні характеристики режимів генерації в кількісному та аналітичному вигляді. Не одержано залежності для основних елементів граничних циклів, які виникають внаслідок біфуркації Хопфа, не побудовано періодичні розв'язки напівкласичних моделей одномодових лазерів. Застосування кількісних методів дозволило дослідити біфуркаційні процеси та побудувати періодичний розв'язок класичної моделі

Статца-Демарса¹⁾. Побудова аналітичного розв'язку напівкласичних моделей дасть можливість вивчати вплив зміни параметрів лазера на його динаміку, проводити цілеспрямований пошук методів керування параметрами для забезпечення роботи лазера в певному режимі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи відповідає науковим програмам НАН і Міністерства освіти і науки України "Перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації, системи зв'язку". Частина роботи виконана у рамках держбюджетної теми "Асимптотичні ієрархічні методи та їх застосування до нелінійних задач електродинаміки" Міністерства освіти і науки України (№ ДР 0103U000770).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є теоретичне дослідження фізичних процесів, які породжують нестійкість та приводять до формування регулярних пульсацій в напівкласичних моделях одномодових лазерів. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- вивчити динаміку балансної моделі твердотільного лазера за наявності модулятора добротності параболічного, кубічного, біквадратичного типу з двома параметрами керування; знайти аналітичні оцінки біфуркаційних порогів, побудувати граничні цикли, дослідити їх стійкість;
- провести чисельне дослідження балансної моделі за наявності квадратичного та кубічного модуляторів добротності; побудувати фазові портрети;
- визначити основні характеристики режиму генерації гігантських імпульсів для балансної моделі за відсутності та наявності в резонаторі квадратично-нелінійного елемента; провести порівняння результатів з класичною моделлю Статца-Демарса;
- встановити вплив біфуркації Хопфа на динаміку моделі лазера з безінерційним фільтром та нелінійним елементом; вивчити стійкість граничного циклу, побудувати періодичні розв'язки;

¹⁾ Шуда І.О. Біфуркаційний аналіз класичних моделей динаміки твердотільних одномодових лазерів: Автореф. дис ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.01/ Сум. держ. ун-т. – Суми, 2004. – 19 с.

- провести біфуркаційний аналіз тривимірної та чотиривимірної напівкласичних моделей одномодового лазера; побудувати періодичні розв'язки.

Об'єктом дослідження є режими стаціонарного випромінювання, неперервної періодичної генерації та генерації гігантських імпульсів.

Предметом дослідження є напівкласичні моделі одномодових лазерів.

Відповідно до поставлених задач використовувались такі основні *методи дослідження*: кількісні методи аналізу систем нелінійних диференціальних рівнянь: алгоритм біфуркації народження циклу та метод Джозефа, а також чисельний метод Рунге-Кутта.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше для балансної моделі одномодового твердотілого лазера за наявності модулятора добротності параболічного, кубічного та біквадратичного типу з двома параметрами керування знайдено аналітичні оцінки біфуркаційних порогів, побудовано інтервали стійкості для параметра накачки та параметрів керування. Одержано періодичні розв'язки для інтенсивності випромінювання та інверсії.
2. Вперше для напівкласичної моделі твердотілого лазера з кубічним модулятором добротності знайдено періодичні розв'язки для інтенсивності випромінювання та різниці заселеності. Виявлено, що наявність відносної відстройки частоти поля від центра спектральної лінії приводить до зменшення амплітуди інтенсивності випромінювання, інверсії, частоти модуляції, збільшує період коливачь, звужує інтервал стійкості стаціонарної інтенсивності.
3. Визначено основні характеристики режиму генерації гігантських імпульсів напівкласичної балансної моделі одномодового твердотілого лазера за відсутності та наявності в резонаторі квадратично-нелінійного елемента.
4. Встановлено, що введення в лазер з безінерційним фільтром квадратично-нелінійного елемента викликає стійку амплітудну модуляцію випромінювання. Одержано інтервали стійкості для параметра накачки. Побудовано періодичні розв'язки для густини

інтенсивності випромінювання, інверсії, ненасиченого поглинання у фільтрі.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи розширюють та поглиблюють знання про режими генерації у напівкласичних моделях одномодових лазерів. Аналітичні залежності можуть бути використані для удосконалення методів керування параметрами лазера, при поставленні обернених задач динаміки лазерів, задач параметричної оптимізації. Знайдені характеристики режиму генерації гігантських імпульсів можуть бути застосовані при розрахунках основних параметрів такого режиму у твердотільних лазерах.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати роботи отримані автором самостійно. Чисельне інтегрування систем і побудова фазових портретів виконувалися сумісно з к.ф.-м.н., доц. Харченком Д.О.

Роботи [3,4,6] виконані автором самостійно. У роботі [1], що була виконана у співавторстві, здобувачем проведено теоретичне дослідження моделі лазера з безінерційним фільтром, розрахунки елементів граничних циклів. У публікаціях [2,5] автор виконав дослідження динаміки балансної моделі при конкретизації функціональних залежностей модуляторів добротності. У роботі [7] здобувачу належать аналітичні результати, отримані у рамках біфуркаційного аналізу моделі, а в роботі [8] – періодичний розв'язок динамічної системи.

Основна частина представлених результатів доповідалася автором особисто на вітчизняних та міжнародних конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалася та обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах: міжнародних конференціях молодих вчених з прикладної фізики (Київ, 2002–2003 рр.); Всеукраїнських конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (Львів, 2002–2004 рр.), ІХ, Х Міжнародних наукових конференціях ім. М.Кравчука (Київ, 2002 р., 2004 р.), Міжнародній конференції "Асимптотичні методи в теорії диференціальних рівнянь" (Київ, 2002 р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів фізико-технічного факультету СумДУ (Суми, 2002-2004 рр.); Міжнародній конференції з математичного моделювання

(Херсон, 2003 р.); Міжнародному семінарі “Моделювання лазерних та волоконно-оптичних систем – LFNМ” (Алушта, 2003 р.).

Публікації. Результати за темою дисертації опубліковані в 14 роботах, з яких 6 статей опубліковані у фахових реферованих журналах.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг дисертації складає 159 сторінок, у тому числі 16 рисунків та 7 таблиць. Список використаних джерел містить 138 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичну значущість результатів, наведено основні дані про внесок здобувача, апробацію роботи, загальну структуру дисертації.

Перший розділ “Динамічні моделі одномодових лазерів. Вибір напрямку дослідження” присвячено огляду літератури за темою дисертації. Висвітлено етапи розвитку проблеми теоретичного вивчення нелінійної динаміки лазерів та її сучасний стан.

Подана класифікація одномодових лазерів за співвідношеннями між релаксаційними параметрами; наведені напівкласичні моделі одномодових лазерів, які є предметом дослідження: балансна модель твердотільного лазера, модель лазера з безінерційним фільтром, модель Лоренца-Хакена та чотирирівнірна модель одномодового лазера біжучої хвилі.

Встановлено, що в основу теоретичного дослідження лазерних моделей покладено якісні методи теорії нелінійних коливань, наведено результати досліджень моделей одномодових лазерів зазначеними методами. Виявлено, що не побудовані періодичні розв’язки відповідних динамічних систем, які виникають внаслідок біфуркації Хопфа, не знайдені критерії стійкості періодичних коливань. На основі цього аналізу вибрано напрямок дослідження та способи отримання результатів.

Методичний апарат дослідження базується на використанні аналітичних методів, які дозволяють провести асимптотичне інтегрування нелінійних систем за умов існування біфуркації

Хопфа – алгоритму біфуркації народження циклу та методу Джозефа. Особливість алгоритму біфуркації народження циклу полягає в тому, що, допустивши наявність певного зв'язку між параметрами моделі, можна очікувати появу періодичного руху навколо стаціонарного розв'язку, аналітичний вигляд якого будується за чітким алгоритмом. Питання про стійкість періодичних коливань з'ясується з вимоги від'ємності показника Флоке. Метод Джозефа має переваги при дослідженні систем трьох та чотирьох диференціальних рівнянь, оскільки дозволяє звести n -вимірну задачу до двовимірної, але не містить механізму дослідження стійкості періодичних коливань.

Другий розділ “Нестационарні режими генерації в балансній моделі лазера на твердому тілі” складається з двох підрозділів, в яких вивчаються режим неперервної періодичної генерації та режим генерації гігантських імпульсів.

У першому підрозділі досліджується балансна модель одномодового твердотільного лазера за наявності модулятора добротності:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Gx \left(\frac{y}{c - ky} - 1 - \varphi(x, a, b) \right), \\ \dot{y} &= A - y - \frac{xy}{c - ky}, \end{aligned} \quad (1)$$

де x – інтенсивність випромінювання; y – різниця заселеності (інверсія); $\varphi(x, a, b)$ – функція керування модулятором добротності; A – параметр накачки; $G \gg 1$ – великий параметр в теорії твердотільних лазерів; k – відношення констант релаксації поля і поляризації атомної системи; Δ – відносна відстройка власної частоти резонатора від центра спектральної лінії; $c = 1 + k + \Delta^2(1 + k)^{-1}$. Всі параметри, фазові координати і час подано в безрозмірній формі.

Встановлено, що введення в резонатор лазера модулятора добротності викликає стійку амплітудну модуляцію випромінювання при біфуркаційному значенні одного з параметрів керування. Біфуркаційний аналіз системи (1) проведено для квадратичної, кубічної та біквадратичної залежностей модулятора добротності від інтенсивності потоку фотонів, у кожній з яких

обидва параметри керування послідовно розглядаються як біфуркаційні.

У випадку квадратичного модулятора добротності $\varphi(x) = ax^2 - bx$ характер розв'язків системи (1) визначається біфуркаційною діаграмою (рис.1).

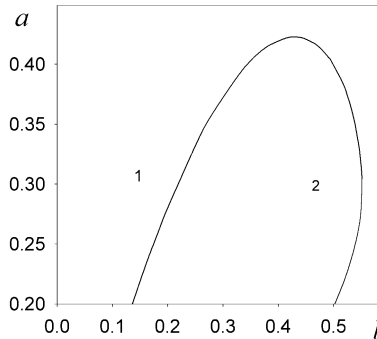


Рис.1. Біфуркаційна діаграма при $G = 400, A = 2, k = 0,1, c = 1,9$

З'ясовано, що конструктивні константи модулятора суттєво впливають на режими випромінювання, при цьому стійкий періодичний сигнал існує в певній області їх варіацій. В області 1 (рис.1) спостерігаються згасаючі коливання (рис.2а), в області 2 (рис.1) існує стійкий граничний цикл (рис.2б), що відповідає модульованому випромінюванню; на лінії відбувається класична біфуркація Хопфа (рис.2в). Збільшений масштаб фазового портрету на лінії біфуркації подано на рис. 2г.

Одержано критерії стійкості періодичних коливань, з яких випливають інтервали стійкості для параметра накачки та параметрів керування, знайдено аналітичний вигляд частоти Рабі:

$$\omega_0^2 = \frac{Gx_c \psi(x_c) (1 + k\psi(x_c))^2}{c}, \quad (2)$$

де $\psi(x_c) = 1 + \varphi(x_c)$; x_c – стаціонарний розв'язок системи (1).

Показано, що частковим випадком формули (2) є частота Рабі класичної моделі Статца-Демарса ($k = \Delta = 0$): $\omega_0^2 = G(A - 1)$. На основі отриманих аналітичних виразів побудовано графічні залежності для елементів граничних циклів. Зокрема, у випадку квадратичного модулятора показано, що зміна біфуркаційного

параметра впливає на характер зміни критерію стійкості в міру зменшення параметра накачки (рис.3).

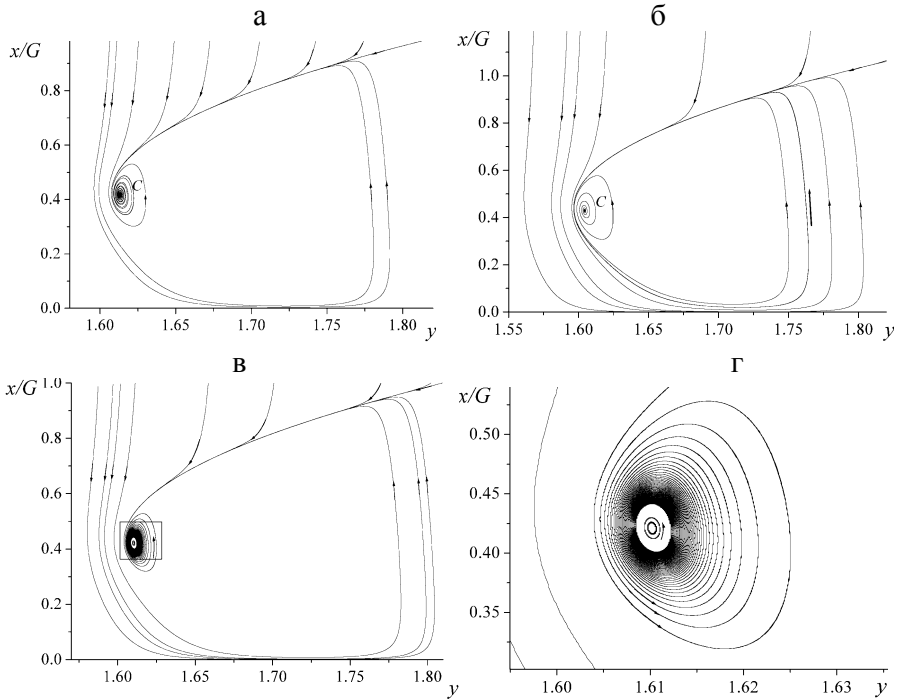


Рис.2. Фазові портрети твердотільного лазера з квадратичним модулятором добротності

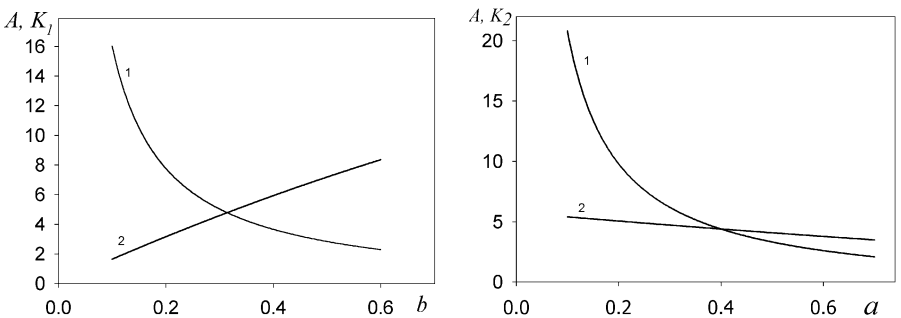


Рис.3. Залежності параметра накачки (крива 1), критерію стійкості (крива 2) від параметрів керування a і b

Побудовано періодичний розв'язок динамічної системи, який конкретизується для різних модуляторів, знайдено період та амплітуду коливань. Встановлено, що у випадку бікватричного модулятора при $b = 8x_c^3$ періодична генерація є стійкою для будь-яких $x_c > 0$, а розв'язок в квадратичному наближенні за параметром ε набирає вигляду

$$\begin{aligned} x &= x_c + \varepsilon \cos \theta + \frac{\varepsilon^2}{3} \cos 2\theta, \\ y &= y_c - \varepsilon(\gamma_1 \cos \theta + \gamma_2 \sin \theta) + \frac{\varepsilon^2}{3}(\gamma_1 \cos 2\theta + \gamma_2 \sin 2\theta), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\theta = \frac{2\pi t}{T}$; $\gamma_1 = \frac{c + x_c \beta^2}{Gx_c \beta^2}$; $\gamma_2 = \frac{\omega_0 c}{Gx_c \beta^2}$; $\beta = 1 + k\psi(x_c)$; T ; ω_0 – період та перше наближення до частоти модуляції.

Досліджено вплив параметрів напівкласичної моделі k, Δ, c на інтервали стійкості для параметра накачки, параметрів керування, стаціонарної інтенсивності, частоти та період коливань.

У другому підрозділі розглядається режим генерації гігантських імпульсів за умови відсутності модулятора $\varphi(x)$. При дослідженні нехтуються процеси релаксації і накачування, що надає другому рівнянню системи (1) вигляду $\dot{y} = -x\eta^{-1}(y)$, $\eta(y) = 1 + k(1 - y) + \Delta^2(1 + k)^{-1}$. Ділення першого рівняння системи на друге та інтегрування результату дає інтенсивність потоку фотонів як функції інверсії

$$x = x_1 + G \left((1 + k)(y_1 - y) - c \ln \frac{y_1}{y} \right), \quad (4)$$

де x_1 – початкове значення інтенсивності; y_1 – максимальна густина інверсії, досягнута перед початком формування імпульсу. Отримано аналітичні залежності для максимального значення інтенсивності x_{\max} , фінального значення інверсії, при якому припиняється генерація, максимальної потужності та тривалості гігантського імпульсу. У граничному випадку $k = \Delta = 0$ показано збіг результатів з аналогічними для класичної моделі.

Третій розділ „Аналіз динаміки напівкласичної моделі твердотільного лазера з кубічним модулятором добротності” складається з двох підрозділів, у яких досліджується модель, що враховує відносну відстройку частоти поля від центра спектральної лінії. Відповідна модель отримана з (1) при $k = 0$, $\delta = (1 + \Delta^2)^{-1}$, $\varphi = ax^3 + bx$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Gx(y\delta - 1 - \varphi(a, b, x)), \\ \dot{y} &= A - y(x\delta + 1). \end{aligned} \quad (5)$$

У результаті чисельного аналізу з’ясовано, що характер поведінки динамічної системи визначається значеннями параметрів a і b , встановлено наявність біфуркації Хопфа. Фазовий портрет системи (5) на лінії біфуркації показано на рис. 4а (у збільшеному масштабі – на рисунку 4б).

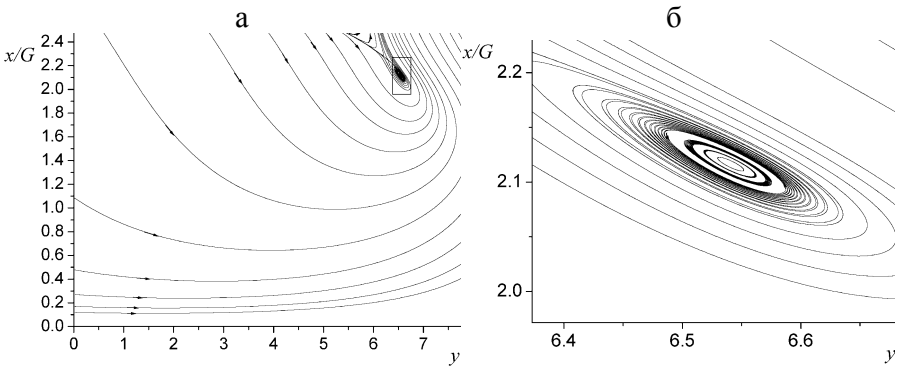


Рис.4. Фазові портрети твердотільного лазера з кубічним модулятором добротності на лінії біфуркації

Встановлено, що у випадку біфуркаційного параметра a_0 критерій стійкості періодичної генерації зводиться до інтервалу стійкості

$$A - \delta^{-1} < x_c < \delta^{-1} \left(A\delta - 1 + \sqrt{(A\delta - 1)^2 + (A\delta - 1)} \right), \quad (6)$$

який дозволяє охопити весь інтервал значень параметра накачки. Наприклад, для неодимового резонатора ($A = 2$) для $\delta = 0,9$ інтервал стійкості набуває значення 0,888–2,222. Отримано

аналітичні вирази для першого наближення до невідомої частоти модуляції, періоду, амплітуди модуляції, потужності випромінювання. Побудовано періодичний розв’язок, проведено його аналіз в лінійному наближенні:

$$\begin{aligned} \Delta x &\equiv x - x_c = \varepsilon \cos \theta, \\ \Delta y &\equiv y - y_c = -\frac{\varepsilon}{Gx_c \delta} (\alpha \cos \theta + \omega_0 \sin \theta), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\theta = \frac{2\pi t}{T}$; $\omega_0 = \delta \sqrt{\frac{GAx_c}{\alpha}}$; $\varepsilon = \left(\frac{8}{3} Ax_c^6 (a_0 - a) Q \right)^{1/2}$;

$$Q = \delta^2 \alpha \left[(A\delta - \alpha)(\alpha - A\delta) - A\delta^2 x_c \right]^{-1}; \quad \alpha = x_c + 1.$$

Показано, що наявність відносної відстройки частоти поля від центра лінії впливає на амплітуди величин Δx і Δy , частоту та період коливань. Шляхом виключення параметра θ із залежностей (7) одержано аналітичний вигляд кривої, що визначає рух фазової точки в першому наближенні.

У другому підрозділі вивчається режим гігантських імпульсів за умови, що у резонатор введено квадратично-нелінійний елемент:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Gx(y\delta - 1) - gx^2, \\ \dot{y} &= -xy\delta, \end{aligned} \quad (8)$$

де g – додатний параметр, що характеризує двофотонне поглинання в нелінійному елементі.

Одержано аналітичні залежності для інтенсивності генерації гігантського імпульсу, її максимального значення, звідки у граничному випадку ($\delta=1$) впливає значення x_{\max} для моделі Статца-Демарса. Отримано максимальну потужність генерації, рівняння для знаходження фінального значення інверсії, тривалість гігантського імпульсу. Встановлено, що максимальна інтенсивність випромінювання змінюється в залежності від значень параметра g .

У четвертому розділі “Автоколивання в твердотільному лазері з безінерційним фільтром” вивчається динаміка лазера, що описується системою рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Gx \left(y - 1 - \frac{\beta}{1 + \gamma x} - gx \right), \\ \dot{y} &= A - y(x + 1), \end{aligned} \quad (9)$$

де x – густина інтенсивності випромінювання; y – інверсія в активному середовищі; G – відношення часу релаксації заселеності активного середовища до часу згасання фотонів в резонаторі; A – параметр накачки; γ – відношення густини насичення активного середовища до густини насичення фільтра; β – параметр пропорційний непросвітленому значенню коефіцієнта поглинання фільтра; g – зведений коефіцієнт взаємодії резонатора і нелінійного елемента.

Встановлено, що внесення в резонатор лазера з фільтром нелінійного елемента викликає стійку амплітудну модуляцію випромінювання при біфуркаційному значенні одного з параметрів. Аналіз проведено за умови $G \gg 1$, як біфуркаційні розглядаються параметри β і g . Знайдено критерії стійкості періодичної генерації, інтервали стійкості для параметра накачки. У випадку біфуркаційного параметра β_0

$$1 < A < \frac{2\alpha^2 \gamma^2 x_c}{2\alpha \gamma^2 x_c - (\gamma x_c + 1)^2 (2 - \gamma x_c)},$$

у випадку біфуркаційного параметра g_0 одержано

$$1 < A < \frac{2\alpha^2 \gamma^2 x_c}{2\alpha \gamma^2 x_c - (2\gamma x_c + 1)(2 - \gamma x_c)}.$$

Показано, що залежно від вибору значень x_c і γ існує достатньо широкий інтервал значень параметра накачки. Зокрема, якщо $x_c = 1,8$, отримано інтервал $1 - 78,48$.

Побудовано наближені періодичні розв'язки для густини інтенсивності випромінювання, інверсії, ненасиченого поглинання у фільтрі у випадку біфуркації Хопфа, знайдено аналітичну оцінку біфуркаційної кривої, запропоновано методику розрахунку елементів граничного циклу.

П'ятий розділ “Біфуркація Хопфа у тривимірних та чотирирівимірних моделях лазерів” складається з двох підрозділів, в

яких для інтегрування нелінійних систем використовується метод Джозефа.

У першому підрозділі досліджується модель Лоренца-Хакена:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \rho(z_2 - z_1), \\ \dot{z}_2 &= z_1 z_3 - z_2, \\ \dot{z}_3 &= \gamma(A - z_3 - z_1 z_2),\end{aligned}\tag{10}$$

де z_1 – модуль амплітуди електричного поля; z_2 – модуль амплітуди поляризації атомної системи; z_3 – нормована різниця заселеності; ρ – відношення констант релаксації поля і поляризації атомної системи; γ – відношення поздовжньої і поперечної констант релаксації середовища.

Проведено біфуркаційний аналіз моделі (10). За допомогою методу Джозефа побудовано періодичний розв’язок системи, який описує режим регулярних автоколивань. Пропонується спосіб дослідження стійкості періодичних розв’язків.

У другому підрозділі досліджується чотиривимірна модель лазера біжучої хвилі, яка в порівнянні з моделлю Лоренца-Хакена враховує відносну відстройку Δ частоти поля від центра спектральної лінії. З’ясовано умови виникнення біфуркації Хопфа, визначено біфуркаційне значення параметра накачки, перше наближення до невідомої частоти модуляції ω . Побудовано періодичний розв’язок.

ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі розв’язана актуальна задача теоретичного дослідження нестационарних режимів генерації в напівкласичних моделях одномодових лазерів. У роботі отримано такі основні результати:

1. Здійснено подальший розвиток методики аналізу процесів, які породжують нестійкість стаціонарної генерації та приводять до формування регулярних пульсацій:

- у рамках алгоритму біфуркації народження циклу побудовано аналітичні розв’язки систем напівкласичних рівнянь одномодових лазерів;
- локальність методу скомпенсована віднесенням стаціонарного розв’язку до незалежних параметрів моделі;

- у рамках методу Джозефа побудовано періодичні розв’язки тривимірної та чотиривимірної моделей одномодових лазерів.

2. Проведено біфуркаційний аналіз напівкласичної балансної моделі з параболічним, кубічним і біквдратичним модулятором добротності. Знайдено критерії стійкості періодичної генерації, інтервали стійкості стаціонарної генерації, параметра накачки, параметрів керування. Теоретично підтверджено існування багатьох порогів стійкості параметра накачки.

3. З’ясовано вплив параметрів напівкласичної моделі на характеристики режиму неперервної періодичної генерації:

- зростання параметра k – відношення констант релаксації поля і поляризації атомної системи, приводить до збільшення інтервалу стійкості параметра накачки, інтервалів стійкості параметрів керування;
- зростання параметра c , який враховує сумарний вплив параметра k та відносної відстройки власної частоти резонатора від центра спектральної лінії, приводить до зменшення частоти модуляції, збільшення періоду коливачь, збільшення інтервалу стійкості стаціонарної інтенсивності;
- наявність параметра Δ – відносної відстройки частоти поля від центра спектральної лінії, приводить до зменшення амплітуди інтенсивності випромінювання, інверсії, частоти модуляції, збільшує період коливачь, звужує інтервал стійкості стаціонарної інтенсивності x_c .

4. Виявлено, що внесення в резонатор лазера з фільтром квадратично-нелінійного елемента викликає стійку амплітудну модуляцію випромінювання при біфуркаційному значенні одного з параметрів лазерної моделі. Визначено інтервали стійкості параметра накачки, отримано аналітичні залежності для частоти модуляції ω_0 , періоду коливачь T , амплітуди модуляції ε .

5. Визначено основні характеристики режиму генерації гігантських імпульсів для балансної напівкласичної моделі одномодового лазера за наявності та відсутності нелінійно-квадратичного елемента. У граничному випадку показано збіг результатів з класичною моделлю Статца-Демарса.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коваленко Г.П., *Коломієць С.В.* Біфуркаційний аналіз динаміки лазерів з автомодуляцією добротності // УФЖ – 2004. – Т.49, № 10.- С. 960 - 965.
2. Коваленко Г.П., *Коломієць С.В.* Дослідження періодичних режимів генерації в одномодових лазерах на твердому тілі // Радиофізика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. –2004. – Т.9, № 2. – С. 413 – 420.
3. *Коломієць С.В.* Дослідження граничного циклу в найпростішій напівкласичній моделі твердотільного лазера // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2003. – № 2 (28). – С. 145–150.
4. *Коломієць С.В.* Аналіз модифікованих балансних рівнянь динаміки твердотільних лазерів // Вісник Львівського ун-ту. Серія фізична. – 2002. – Вип. 35. – С. 110–116.
5. Коваленко Г.П., *Коломієць С.В.* Дослідження біфуркації в напівкласичних моделях лазерів на твердому тілі // Вісник КНУ. Радиофізика та електроніка. – 2004. – Вип. 7. – С. 17 –20.
6. *Коломієць С.В.* Біфуркація Хопфа в динаміці лазера типу Лоренца-Хакена // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2002. – №13 (46). – С. 22–27.
7. Харченко Д.О., *Коломієць С.В.*, Харченко В.О. Модульоване стійке періодичне випромінювання у твердотільних лазерах // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.– 2004.– №10 (69). – С. 218–224.
8. Коваленко Г.П., *Коломієць С.В.* Біфуркація Хопфа в динаміці одномодового твердотільного лазера // Вестник ХГТУ. – 2003. – № 3 (19). – С. 165–169.
9. *Коломієць С.В.* Інтегрування диференціальних рівнянь напівкласичних моделей динаміки лазерів // Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції ім. акад. М. Кравчука. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2002.– С. 98.
10. *Коломієць С.В.*, Шуда І.О. Асимптотичні методи інтегрування нелінійних рівнянь динамічних систем // Тези доповідей Міжнародної конференції “Асимптотичні методи в теорії диференціальних рівнянь”. – Київ: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2002. – С. 54.

11. Коломієць С.В. Дослідження біфуркації Хопфа в напівкласичній моделі твердотільного лазера // Тези науково-технічної конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студентів СумДУ. – Суми: СумДУ, 2003. – С.129–130.
12. Kolomiets S. V. Stability of Limiting Cycle in Semi-classical Model of Single-mode Solid-state laser // Proc. International Work of laser and Fiber-Optical Networks Modeling. – Alushta, 2003. – P. 56–58.
13. Коломієць С.В. Аналіз стійкості граничного циклу в динаміці твердотільного лазера // Тези Всеукраїнської конф. молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики. – Львів: ЛНУ, 2003. – С. 67.
14. Kovalenko G.P., Kolomiets S.V. Nonlinear Effects in Semi-classical Model of Solid-state Laser // Праці четвертої Міжнародної конференції молодих вчених з прикладної фізики. – Київ: КНУ, 2004. – С. 30–31.

АНОТАЦІЯ

Коломієць С.В. Динаміка напівкласичних моделей одномодових лазерів з модуляцією добротності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2005.

Дисертація присвячена теоретичному дослідженню нестационарних режимів генерації в напівкласичних моделях одномодових лазерів. Запропонована методика аналізу лазерних моделей, яка ґрунтується на використанні алгоритму біфуркації народження циклу та методу Джозефа. Проведено біфуркаційний аналіз балансної моделі твердотільного лазера з квадратичним, кубічним, біквадратичним модуляторами добротності; моделі лазера з безінерційним фільтром. Отримано критерії стійкості періодичних коливань інтенсивності, інтервали стійкості для параметрів моделі; побудовано періодичні розв'язки. Для балансної моделі визначено характеристики режиму генерації гігантських імпульсів. Побудовано періодичний розв'язок моделі Лоренца-Хакена та чотиривимірної моделі одномодового лазера.

Ключові слова: лазер, параметр, біфуркація, граничний цикл, фазовий портрет, інтенсивність, інверсія, гігантський імпульс.

АННОТАЦИЯ

Коломиец С.В. Динамика полуклассических моделей одномодовых лазеров с модуляцией добротности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2005.

По мере развития лазерной техники особое внимание уделяется теоретическому изучению динамики процессов, определяющих физическую картину работы лазера в различных режимах, которое базируется на анализе полуклассических моделей. В настоящее время основу теоретического исследования составляют качественные методы теории нелинейных колебаний, что не позволяет получить аналитические зависимости для характеристик режимов генерации. В частности, не найдены зависимости для основных элементов предельных циклов, возникающих в результате бифуркации Хопфа, не построены решения полуклассических систем уравнений одномодовых лазеров. Применение количественных методов позволит построить периодические решения, а также путем их анализа изучить влияние параметров на динамику лазера.

Диссертация посвящена теоретическому изучению нестационарных режимов генерации в полуклассических моделях одномодовых лазеров. В работе получила дальнейшее развитие методика исследования бифуркационных процессов в лазерных моделях, базирующаяся на использовании алгоритма бифуркации рождения цикла и метода Джозефа.

Бифуркационный анализ балансной модели твердотельного лазера проведен при наличии квадратического, кубического и биквадратического модулятора добротности. Найдены интервалы устойчивости для параметра накачки и параметров управления. Получены периодические решения для интенсивности излучения и инверсной заселенности. Исследовано влияние параметров полуклассической модели на элементы предельных циклов. При изучении режима генерации гигантских импульсов найдены аналитические зависимости для интенсивности излучения, финального значения инверсии, максимальной мощности и

длительности гигантского импульса. В предельном случае показано совпадение результатов с классической моделью Статца-Демарса.

Установлено, что введение в резонатор лазера с фильтром квадратично-нелинейного элемента вызывает устойчивую амплитудную модуляцию излучения при бифуркационном значении одного из параметров. Найдены интервалы устойчивости параметра накачки; построены периодические решения для плотности интенсивности излучения, инверсии, ненасыщенного поглощения в фильтре.

Выполнен бифуркационный анализ модели Лоренца-Хакена и четырехмерной модели лазера бегущей волны. Построены периодические решения динамических систем, возникающие вследствие потери устойчивости стационарного решения.

Ключевые слова: лазер, параметр, бифуркация, предельный цикл, фазовый портрет, интенсивность, инверсия, гигантский импульс.

SUMMARY

Kolomiets S.V. Dynamics of semi-classical models of single-mode Q-switched lasers – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy (Ph.D.) degree in physics and mathematics, speciality 01.04.01 – physics of apparatus, components and systems. Sumy State University, Sumy, 2005.

The dissertation is devoted theoretical research of non-stationary oscillating modes in semi-classical models of single-mode lasers. Laser models analysis method offered is based on use of Hopf's bifurcation and Joseph's method. Bifurcation analysis of solid-state laser balanced model was carried out with quadratic, cubic, biquadratic Q-switch; laser model with inertia-free filter was studied. Criteria of stability of periodic oscillations under Hopf's bifurcation, stability intervals for the model parameters have been obtained; the periodic solutions have been constructed. Giant pulse generation mode characteristics were determined for balanced model. Periodic solutions of Lorentz-Haken model and four-dimensional model of single-mode laser have been found.

Key words: laser, parameter, bifurcation, limiting cycle, phase-plane portrait, intensity, inversion, giant pulse.