МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРА С ПРОСВЕТЛЯЮЩИМСЯ ФИЛЬТРОМ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕЙ ПОДСВЕТКИ

В. А. Ранцевич, Н. В. Спичекова
БГУИР, Минск, Беларусь
rvbrva@tut.by, n.spichekova@gmail.com

Известно, что кинетику генерации оптического квантового генератора можно описать системой уравнений Максвелла для поля и системой уравнений для матрицы плотности вещества, но решение их даже в случае простейших моделей лазеров представляет собой сложную задачу. Данную задачу можно упростить путем перехода к точечной модели, если не учитывать распределение поля и поляризацию вещества по длине активных элементов. Замена распределенной модели точечной моделью приемлема, если характеристики элементов лазера и поля излучения незначительно изменяются по длине, в противном случае, каждый элемент можно разбить на несколько частей, в пределах которых характеристики вещества и поля постоянны. Такой подход аналогичен обычному способу интегрирования системы дифференциальных уравнений (Самсон, 1979). В работах Самсон (1984, 1985) именно такие системы балансных уравнений исследованы методами качественной теории дифференциальных уравнений и полученные результаты соответствовали проведенным экспериментам. Лазер с просветляющимся фильтром является одним из интереснейших объектов исследования в теории и на практике. В резонаторе такого лазера имеется ячейка с веществом, поглощение которого уменьшается под действием генерируемого излучения, т.н. просветляющийся фильтр, что приводит к возможности наблюдать все виды режимов работы: стационарную генерацию, автоколебания, хаотические пульсации. Влияние внешней подсветки на кинетику генерации лазера с просветляющимся фильтром рассмотрено впервые в работах Ранцевич, Самсон (1987, 1989). Установлено, что облучение просветляющегося фильтра внешним источником излучения может обеспечить лазерной системе новые свойства и дает возможность бесконтактного дистанционного управления ею, управление светом с помощью света. Целью доклада является демонстрация такого управления лазером с помощью численного моделирования режимов при конкретных параметрах системы.

Рассмотрим систему балансных уравнений, описывающую динамику генератора с инерционным просветляющимся фильтром при наличии внешней подсветки u_0.

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = vu(y-1-x) + vu_0, \\ \dfrac{dy}{dt} = y_0 - y - yu, \\ \dfrac{dx}{dt} = q(x_0 - x - \sigma ux). \end{cases}$$

Входящие в систему переменные и параметры имеют следующий физический смысл: переменная u характеризует отношение вероятности вынужденного перехода в канале генерации к вероятности релаксации активного вещества (пропорционально плотности генерируемого излучения); y, y_0 — соответственно коэффициент усиления и ненасыщенный коэффициент усиления за счет фильтра; x, x_0 — коэффициент поглощения фильтра и ненасыщенный коэффициент потерь за счет фильтра; σ — безразмерный параметр нелинейности; параметр q обратно пропорционален времени релаксации фильтра в относительных величинах, параметр v — пропорционален скорости света, коэффициенту заполнения активным веществом резонатора, коэффициенту потерь, не зависящему от u и обратно пропорциональный вероятности релаксации; u_0 характеризует интенсивность внешней подсветки. Безразмерное время t равно произведению времени на вероятность релаксации активного вещества. Переменные u, y, x и все параметры неотрицательны и изменяются в широких пределах, обусловленных выбором усиливающей среды и фильтра. Количество особых точек системы в зависимости от параметров x_0, y_0, σ и u_0 варьируется от одной особой точки до трех. Координаты особых точек системы определяются из уравнений

$$u^3 - u^2(u_0 + B) - u(u_0(1+\sigma) - \delta)\sigma^{-1} - u_0\sigma^{-1} = 0,\ y = \frac{y_0}{1+u},$$

$$x = \frac{x_0}{1+\sigma u}.$$

Коэффициенты B, δ зависят от параметров x_0, y_0, σ, которые и играют определяющую роль на возможность количественной реализации особых точек. Введение замены переменной позволяет перейти к кубическому уравнению канонического вида $\overline{u}^3 - P\overline{u} - Q = 0$, которое определяет двумерное многообразие катастрофы сборки. Внутри области, имеющей форму сборки, система имеет при одном и том же значении мощности внешней подсветки три изолированные особые точки, вне границы — единственную особую точку и на границе — две особые точки, одна из которых дважды вырожденная, в начале координат — единственная, трижды вырожденная особая точка. Проекция равновесной поверхности на плоскость управляющих параметров P, Q представляет собой кривую, описываемую уравнением $27Q^2 - 4P^3 = 0$. Полученные аналитические выражения для границ в пространстве этих параметров позволяют определить области существования различной конфигурации равновесных кривых (рис. 1).

Как видно из проведенных вычислений, области 3 и 4 с ростом σ сокращаются. В области 1 реализуется 1-й тип кривой, которая однозначна при $u_0 > 0$, в области 2 — при $u_0 \in [0, a]$ система имеет три особые точки, в области 3 — интервал многозначности не включает $u_0 = 0$, в области 4 — равновесная кривая всюду однозначна, но содержит точку перегиба.

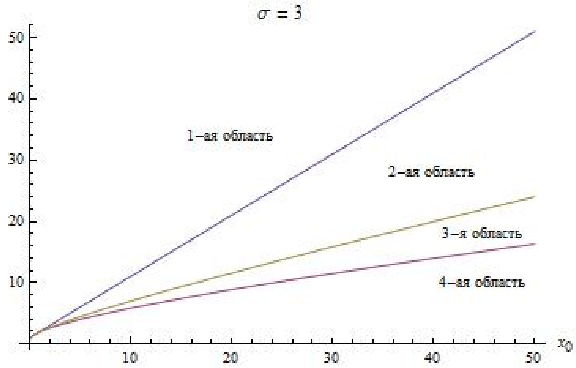


Рис.1.а

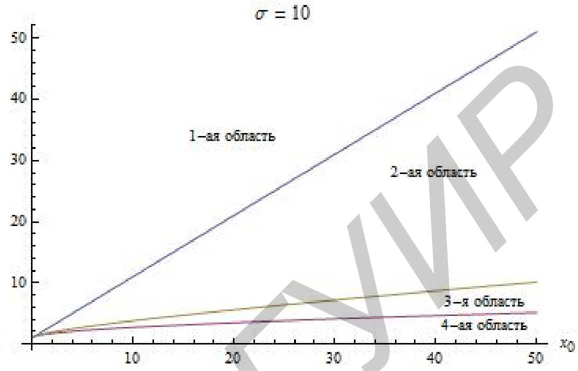


Рис.1.б

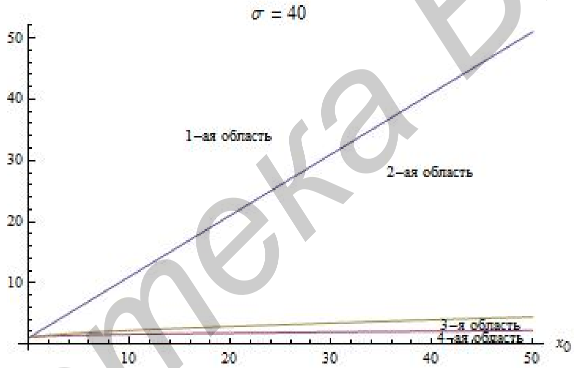


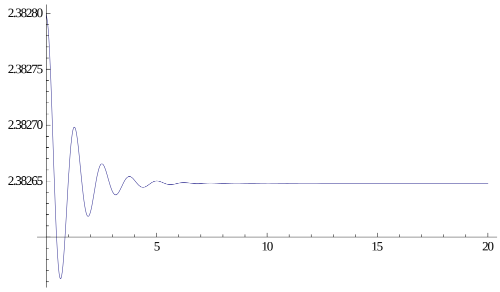
Рис. 1.в

Линеаризация системы в окрестности особых точек и анализ корней характеристического уравнения позволил установить, что в случае трех особых точек, средняя всегда имеет тип седло-фокус или седло-узел, а устойчивость остальных точек определяется знаком выражения

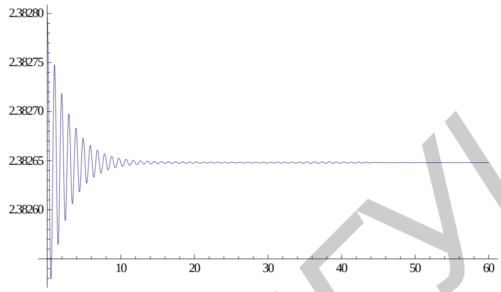
$$T_2 = v^2 q d_0 + v q^2 d_1 + v^2 d_2 + q^2 d_3 + v q d_4 + v d_5 + q d_6,$$

где $d_i = d_i(x_0, y_0, \sigma, u_0), \quad i = 0,1,2,...,6.$

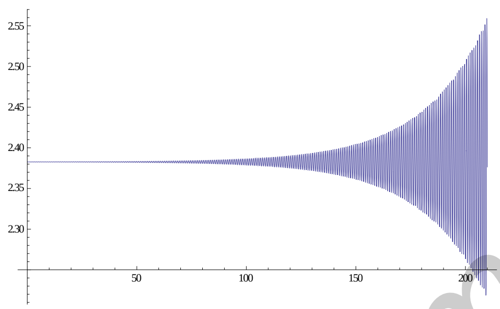
Построение проекций поверхности $T_2 = 0$ при одном и том же фиксированном значении внешней подсветки u_0 на плоскость v, q для внешних особых точек позволило осуществлять подбор параметров v и q так, чтобы были различные сочетания по устойчивости у положений равновесия: два устойчивых фокуса, устойчивый узел и фокус, неустойчивый фокус и устойчивый узел и т.д. Установлено, что при малых значениях одного из параметров v или q нельзя перевести устойчивую особую точку в состояние неустойчивости никаким увеличением другого параметра релаксации. Исследование знака первой ляпуновской величины вдоль бифуркационной поверхности негрубого фокуса позволило уточнить качественную картину динамических режимов. Установлено, что в зависимости от параметров u_0, v, q можно получать моно-, би— и трехстабильность в работе лазера, а также осуществлять мягкое или жесткое возбуждение колебаний. Качественные фазовые портреты подтверждены численными расчетами на ПК. Ниже приведены расчеты интегральной кривой системы на плоскости t, u при изменении только параметра v при одних и тех же параметрах системы x_0, y_0, σ, u_0 и одинаковых начальных данных.



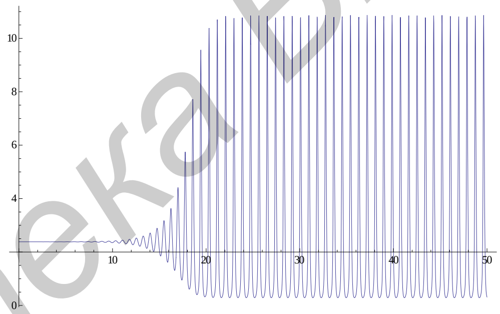
$v = 12$



$v = 20$



$v = 27$



$v = 37$

Список литературы

Ранцевич, В. А., Самсон А. М. (1987). Полистабильность, автоколебания и гистерезис в лазере с просветляющимся фильтром при внешней подсветке. Препринт / Ин-т физики АН БССР: №452. Минск.

Ранцевич, В. А., Самсон, А. М. (1989). О предельных циклах динамической системы, моделирующей работу лазера. *Дифф.уравн.*, (4), 48—53.

Самсон, А. М. (1979). *Высокочастотная автомодуляция излучения лазеров генерация сверхкоротких импульсов*. Препринт / Ин-т физики АН БССР: № 189. Минск.

Самсон, А. М. (1984). *Равновесные состояния, автоколебания, полистабильность и гистерезисные явления в лазере с просветляющимся фильтром*. Препринт / Ин-т физики АН БССР: №321. Минск: 1984.

Самсон, А. М. (1985). Разнообразие режимов генерации, полистабильность и гистерезисные явления в лазерах с просветляющимися фильтрами. *ЖПС, 42* (2), 181—192.