

## Раздел VI. Новые информационные технологии в энергетике

УДК.535.8

**М.В. Орда-Жигулина, Ю.И. Алексеев**

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИ СВЧ-МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ (ИПЛ) МЕТОДОМ ДУФФИНГА

*Обсуждаются схема и результаты экспериментального исследования статических модуляционных характеристик микрополоскового макета оптического СВЧ-модулятора, разработанного на основе бескорпусного инжекционного полупроводникового лазера (ИПЛ), анализируются режимы модуляции излучения.*

*Рассматриваются области применения устройств модуляции: элементы управления радиооптическими антенными решетками, специализированные системы связи.*

*Радиопередающее устройство; энергетика.*

**M.V. Orda-Zhigulina, Yu.I. Alekseev**

### A STUDY OF NONLINEAR AT MICROWAVE MODULATION OF SEMICONDUCTOR INJECTION LASERS (IPL) METHOD DUFFING

*We discuss the scheme and the experimental results of static modulation characteristics of the microstrip layout of the optical micro-modulator, based on the frameless injection semiconductor laser (IPL), analyzes the modes of modulation.*

*We consider the application of modulation devices: controls the radio-antenna arrays, specialized communications systems.*

*Radio transmitters; power.*

В настоящее время остается актуальной задача анализа нелинейных свойств ИПЛ в процессе их модуляции сигналами СВЧ-диапазона, так как подобные модуляторы широко применяются в устройствах, работающих на стыке оптического диапазона длин волн и СВЧ-диапазона в специализированных системах связи. Одной из возможных областей применения устройств модуляции такого типа являются элементы управления радиооптическими антенными решетками. Другой областью применения подобных устройств могут быть специализированные системы связи, например, спутниковой системы навигации ГЛОНАСС, где для передачи информационных сигналов могут быть использованы не только эфирные, но и волоконно-оптические каналы связи. В то время как информационный сигнал от спутника передается на навигационных частотах L1 (1,60256–1,6155 ГГц) и L2 (порядка 1,2276 ГГц), информационные сигналы станций дифференциальных поправок могут передаваться, в том числе, и по существующим широкополосным оптическим каналам связи. Следовательно, при передаче сигналов по таким каналам связи необходимо обеспечивать не только высокую стабильность модулированного оптического излучения, но и уметь заранее определять режимы работы модуляторов, когда нелинейности не вносят существенных искажений.

Для анализа режима модуляции излучения ИПЛ СВЧ-сигналами было исследовано полное уравнение ИПЛ. Процесс модуляции значительно усиливает нелинейные свойства ИПЛ, что может привести к неустойчивой работе системы, сопровождаемой срывом основного режима.

Обычно анализ нелинейных свойств автоколебательных систем ведется с учётом их нелинейного импеданса, информация о котором содержится в коэффициенте при первой производной уравнения, описывающего поведение системы. В то же время, в зависимости от электрофизических параметров исследуемой системы, нелинейность может содержаться и в самой восстанавливающей силе, что превращает такую колебательную систему в существенно нелинейную.

Внешнее воздействие на ИПЛ было рассмотрено на основе применения известного аппарата теории колебаний. Полное уравнение, полученное на основе балансных уравнений ИПЛ [1], имеет вид

$$\frac{d^2 J}{dt^2} + \frac{1}{\tau_s} \frac{d J}{dt} - \left[ \frac{I_g \cdot \sigma_r \cdot V_c}{eV} - \frac{V_c \cdot (\beta_o + \beta_U)}{\tau_s} \right] J = \frac{1}{J} \frac{d^2 J}{dt^2} - \sigma_r J \frac{d J}{dt} - (\beta_o + \beta_U) \cdot V_c \cdot \sigma_r \cdot J^2,$$

где  $I_g$  – инжекционный ток ИПЛ;  $\tau_s$  – спонтанное время жизни избыточных электронов;  $\sigma_r$  – поперечное сечение вынужденного излучения межзонных переходов носителей заряда;  $e$  – заряд электрона;  $V$  – объем активного слоя лазера;  $\beta_o$  – погонные потери;  $\beta_U$  – полезные потери на излучение;  $V_c$  – скорость света в активном элементе лазера.

При анализе ИПЛ как автоколебательной системы уравнение (1) принято упрощать до выражения [2,3,4]

$$\frac{d^2 J}{dt^2} + \frac{1}{\tau_s} \frac{d J}{dt} - \left[ \frac{I_g \cdot \sigma_r \cdot V_c}{eV} - \frac{V_c \cdot (\beta_o + \beta_U)}{\tau_s} \right] J = 0,$$

представляющего дифференциальное уравнение нелинейного осциллятора [4]. Причем, упрощение проводится при строгом соблюдении правил, распространяющихся на «грубые» активные колебательные системы [5], каковой и является ИПЛ.

Следуя [2], будем полагать, что для исключения некоторых членов уравнения (1) есть условия, выражающиеся в наличии малого параметра перед членом уравнения

$\sigma_r J \frac{d J}{dt}$ , т.е., имеются условия, обеспечивающие строгий переход к упрощенному анализу уравнения (1), причем, условия эти выполняются в случае лазеров класса В, к которому относится ИПЛ [2].

С учетом внешнего воздействия (при модуляции) будем иметь уравнение

$$\frac{d^2 J}{dt^2} + \sigma_r J_0 \frac{d J}{dt} - \left[ \frac{I_g \cdot \sigma_r \cdot V_c}{eV} - \frac{V_c \cdot (\beta_o + \beta_U)}{\tau_s} \right] J + (\beta_o + \beta_U) \cdot V_c \cdot \sigma_r \cdot J^3 = F_{свч} \cdot \cos(\omega_{свч} t),$$

где  $F_{свч}$ ,  $\omega_{свч}$  – амплитуда и частота модулирующего сигнала. Введем обозначения:

$$a = \frac{I_g \cdot \sigma_r \cdot V_c}{eV} - \frac{V_c \cdot (\beta_o + \beta_U)}{\tau_s}, \quad b = (\beta_o + \beta_U) \cdot V_c \cdot \sigma_r, \quad c = \sigma_r J_0, \quad \beta = \frac{b}{J_0},$$

$\alpha = -a$ , где  $J_0$  – амплитуда стационарных колебаний ИПЛ. После формализации уравнений движения [5,7], уравнение (2) приводится к уравнению вынужденных колебаний с нелинейной восстанавливающей силой (уравнение Дуффинга) [4,8,9]:

$$\ddot{x} + c\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = F_{свч} \cdot \cos(\omega_{свч} t),$$

в котором многочлен  $\alpha x + \beta x^3$  представляет нелинейную восстанавливающую силу, а подстановка  $x = J \cdot \cos(\alpha t)$  является переходом от формализованного уравнения к исследуемому ( $J, \omega$  – амплитуда и частота излучения ИПЛ).

Выделение из полного уравнения модулируемого ИПЛ уравнения Дуффинга позволяет сделать вывод о том, что при исследовании устойчивости, развитие сценария перехода подобной колебательной системы из одного состояния в другое будет проходить сложно [5,6]. Следовательно, необходимо полностью исследовать процесс, используя аналитический аппарат уравнения Дуффинга [4,8,9]. В подобных колебательных системах при анализе устойчивости следует ожидать, по меньшей мере, нестационарное поведение [8,9].

При исследовании устойчивости следует использовать аппарат анализа уравнения Дуффинга, предложенный в [4], согласно которому уравнение геометрического места точек, в которых амплитудно-частотные кривые имеют вертикальные касательные, имеет вид

$$\omega^2 = \alpha + \frac{3}{4}\beta A^2 - \beta \frac{F_{0свч}}{A},$$

которое совпадает с равенством Дуффинга при  $F_{свч} = \beta F_{0свч}$  [4]. Решение уравнения (4) обычно представляется в виде семейства кривых, для которых амплитуда возмущающей силы играет роль параметра. Такие кривые называются амплитудно-частотными кривыми и при  $\beta = 0$  приводятся к известным амплитудным кривым вынужденных линейных колебаний [4, 7, 8].

Из уравнения (4) следует, что в плоскости параметров  $\omega - A$  кривые, представляющие решение (4), будут иметь известный в теории колебаний вид [7,8,9]. Учет нелинейности восстанавливающей силы в дифференциальном уравнении (1) приводит к получению нелинейной АЧХ, исследуемой системы, что хорошо согласуется с анализом подобных систем [3,4,8,] и свидетельствует о некорректности опущения некоторых членов уравнения (1) при исследованиях чисто автоколебательных режимов [3]. Полученные результаты позволяют свободно реализовывать два вида амплитудно-частотных характеристик при ( $\beta > 0$ ) и ( $\beta < 0$ ), которые качественно совпадают с результатами анализа уравнения Дуффинга [4,8]. АЧХ, которые могут быть получены в результате проведенного анализа, должны иметь нелинейность, приводящую к амплитудно-частотной конверсии в системе.

Важное значение работы состоит в получении возможности исследования устойчивости сложных колебательных систем таких, как ИПЛ, на который непосредственно воздействуют модулирующим сигналом.

Амплитудно-частотная конверсия, присутствующая в нелинейной системе, которой является ИПЛ под воздействием модулирующего сигнала, и описываемой уравнением Дуффинга, позволяет предположить, что системы в малосигнальном диапазоне внешних воздействующих сил  $F_{свч}$  могут быть устойчивы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. – М.: Наука: Физматлит, 1999.
2. Арнольд В.И. Теория катастроф. – М.: Наука, Физматлит, 1990.
3. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. – М.: Иностранная литература, 1952.
4. Алексеев Ю.И. Определение параметрических бифуркаций при анализе устойчивости колебаний инжекционных полупроводниковых лазеров. – М.: Нелинейный мир, 2005. – № 3. – С. 37-38.
5. Алексеев Ю.И., Орда-Жигулина М.В., Михеев С.С. Анализ устойчивости инжекционных полупроводниковых лазеров методами теории колебаний // Радиотехника и электроника. – 2006. – № 43. – С. 476-479.
6. Андронов А.А., Витт А.А., С.Э. Хайкин. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
7. Крюков Б.И. Вынужденные колебания существенно нелинейных систем. – М.: Машиностроение, 1984.
8. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1969.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Гайдук.

**Орда-Жигулина Марина Владимировна**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: jigulina@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел: 88634371733.

Кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент.

**Алексеев Юрий Иванович**

E-mail: jigulina@mail.ru.

Кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор.

**Orda-Zhigulina Marina Vladimirovna**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: jigulina@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371733.

The Department of Antennas and Radio Transmitters; Associate Professor.

**Alekseev Yuriy Ivanovich**

E-mail: jigulina@mail.ru.

The Department of Antennas and Radio Transmitters; Professor.

УДК 501.462

**Е.А. Плаксиенко**

**СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ОБЪЕКТАМИ**

*Рассмотрена проблематика синтеза управления нелинейными энергетическими объектами на основе метода Ляпунова, преобразования переменных состояния, синтеза управления путем приведения уравнений объекта к управляемой форме Жордана.*

*Предложен аналитический метод синтеза стабилизирующих управлений нелинейными энергетическими объектами путем приведения их уравнений к специальной форме. Получены условия существования решения задачи синтеза. Приводится численный пример.*

*Энергетический объект; нелинейность; преобразование; управление.*