

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРЕ С ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ В УСЛОВИЯХ ШУМОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРА НАКАЧКИ

Последние достижения в области лазерной техники делают все более перспективным применение пассивной модуляции лазерного излучения в системах связи. Однако лазеры все еще остаются недоступными большинству корпоративных пользователей из-за сложностей и дороговизны эксплуатации элементов их управления и питания. Такие преимущества, как монохроматичность, когерентность, высокая плотность лазерного излучения нивелируются дороговизной модулирующих и управляющих устройств. В качестве альтернативы перспективно использование пассивных модуляторов, стоимость которых на порядок ниже стоимости активных модулирующих устройств, а по своим параметрам они могут не уступать активным.

Одним из основных недостатков использования пассивных модуляторов является большая нестабильность частоты следования импульсов лазерного излучения при сравнительно низком ее значении. Частота следования генерируемых импульсов по своей величине пока может удовлетворять условиям использования лазеров с пассивной модуляцией лишь в локации, а также в технологических целях.

В качестве математической модели лазера с внутрирезонаторным пассивным модулятором удобно использовать систему балансных уравнений [1], которая, как показали эксперименты, достаточно точно описывает кинетические процессы в лазере с нелинейным насыщающимся поглотителем, помещенным внутрь резонатора:

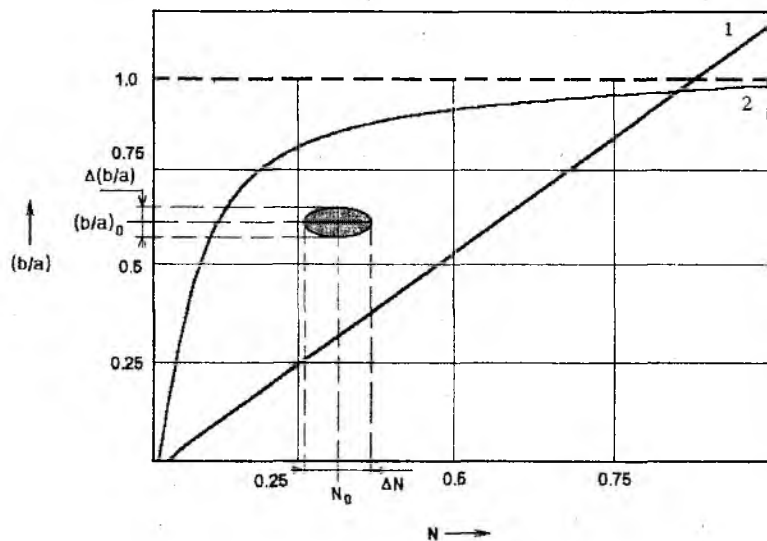
$$\begin{cases} \frac{di}{du} = i \cdot (a\delta - b\delta' - d), \\ \frac{d\delta}{du} = -(\mu i + N + \beta) \cdot \delta + N, \\ \frac{d\delta'}{du} = -(2i + 1) \cdot \delta' + 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$i = I\delta' \tau'; \quad \delta = \frac{\Delta}{n_0}; \quad \delta' = \frac{\Delta'}{n'_0}; \quad u = \frac{t}{\tau}; \quad \beta = \frac{\tau'}{\tau}; \quad a = \frac{l}{z} c \sigma n_0 \tau'; \quad b = \frac{l'}{z} c \sigma' n'_0 \tau';$$

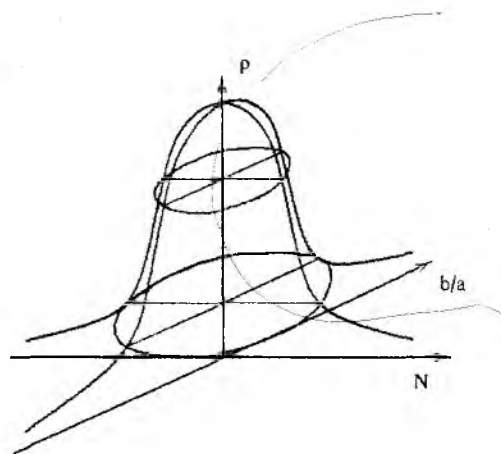
$$\Delta_0 = \frac{W n_0 \tau}{W \tau + 1}; \quad d = \frac{c \lambda}{z}; \quad \mu = \frac{\sigma}{\sigma'}; \quad N = W \tau'; \quad \frac{1}{\tau_0} = W + \frac{1}{\tau}. \quad (2)$$

где I – суммарная интенсивность лазерного излучения внутри резонатора; c – скорость света в свободном пространстве; σ – эффективное сечение взаимодействия активной среды; σ' – эффективное сечение взаимодействия пассивной среды; Δ – инверсия населенности активной среды; Δ' – инверсия населенности пассивной среды; z – длина лазера; l – длина активного участка; l' – длина пассивного участка; γ – потери в резонаторе; $n'_0 = n'_1 + n'_2$ – плотности частиц на соответствующих энергетических уровнях; $n_0 = n_1 + n_2 + n_3$ – общая плотность частиц в активной среде; W – вероятность возбуждения частиц рабочего вещества; τ – время жизни частиц на метастабильном уровне активного вещества [1].

Данная система характеризуется диаграммой устойчивости (рис. 1а), которая определяет режимы работы лазера с пассивным модулятором. Область, заключенная между кривой 2 и прямой 1, характеризует импульсный режим работы. Задаваясь параметрами накачки и плотности частиц в активной и пассивной средах, определяется положение рабочей точки, которая в реальных системах постоянно смещается в результате воздействия шумовых процессов. Поэтому рабочая точка получает форму эллипса с нормальным распределением плотности вероятности (рис. 1б) [2].



(а)



(б)

Рис. 1

Разделяя функцию периода на две составляющие, можно существенно упростить задачу нахождения приближенных аналитических решений системы (1). В работе [1] путем приближенного решения были получены уравнения для эквиинтервальных кривых (кривых равного временного промежутка между импульсами), которые были подтверждены моделированием сетки рабочих точек в области импульсного режима. Таким образом, выражение для периода импульсных колебаний можно записать в виде

$$T = t_{\text{умн}} + t_{\text{инт}}. \quad (3)$$

На рисунке (2) схематически показаны графики функций $t_{\text{умн}}(b/a, N)$ и $t_{\text{инт}}(b/a, N)$ при $b/a = \text{const}$ и различной ширине импульсной области, которая определяется параметрами β и μ .

Как видно из рис. 2, сужение импульсной области приводит к сближению асимптот функций $t_{\text{умн}}(b/a, N)$ и $t_{\text{инт}}(b/a, N)$, вследствие чего увеличивается значение T_{min} (минимального периода импульсных колебаний) и уменьшается диапазон допустимых флуктуаций ΔN . Таким образом, крутизна функции периода тем больше, чем меньше ширина импульсной области. Нетрудно видеть, что при одном и том же уровне шумов флуктуации периода будут выше в системе с более узкой импульсной областью.

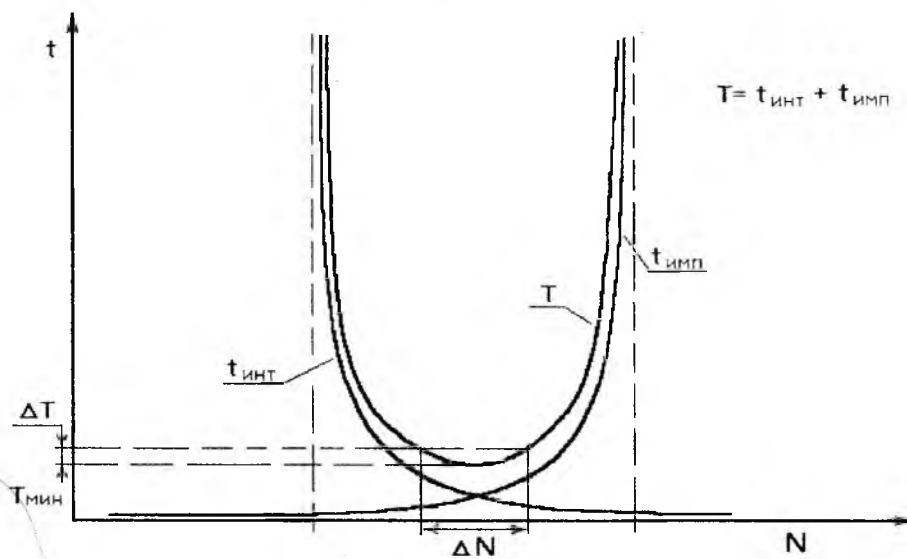
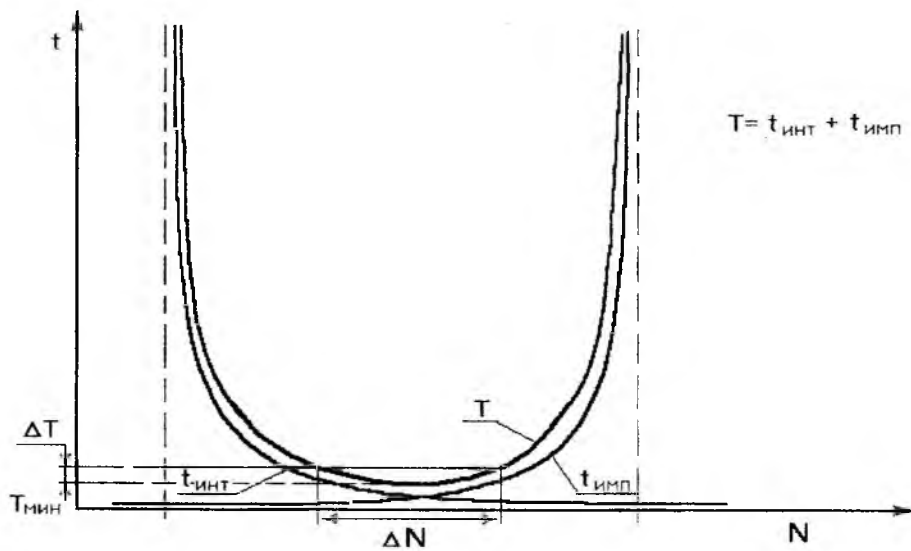


Рис. 2

Сложение функций $t_{\text{имп}}(b/a, N)$ и $t_{\text{инт}}(b/a, N)$ определяет распределение периода колебаний в импульсной области или так называемое частотное распределение, рис. 3:

$$f = \frac{1}{t_{\text{имп}} + t_{\text{инт}}} \quad (4)$$

Кроме того, максимум функции частоты увеличивается по мере уменьшения b/a (рис. 4), это происходит за счет уменьшения пороговой инверсии, в результате чего снижается пиковая мощность генерируемых импульсов [1].

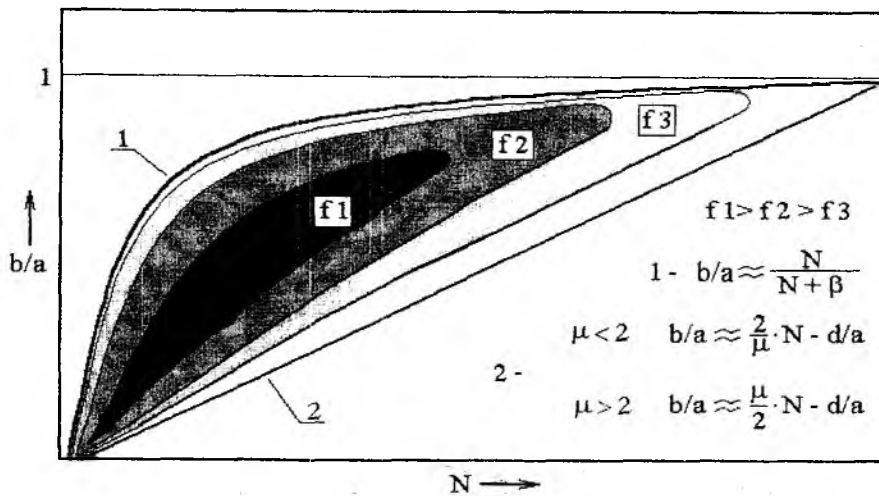


Рис. 3

Таким образом, задаваясь значениями параметров b/a и N , можно добиться необходимого соотношения частоты и пиковой мощности. Подбирая β и μ , можно добиться значительного уширения импульсной области, а значит, увеличения частоты следования импульсов и повышения устойчивости без снижения пиковой мощности.

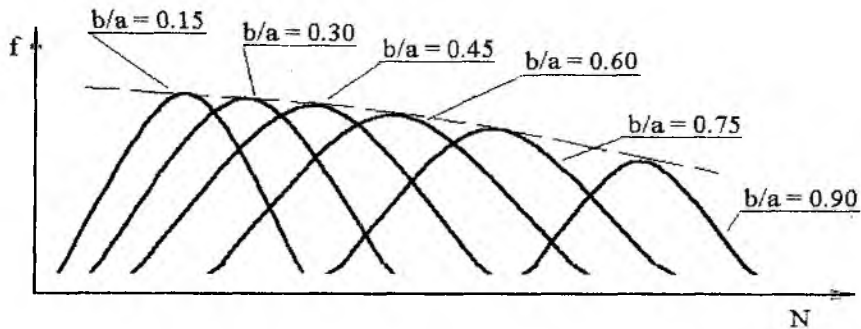


Рис. 4

Целью этой работы являлось определение количественных и качественных характеристик реакции модели лазера с пассивным модулятором на шумовые флуктуации с гауссовым распределением плотности вероятности (нормальный шум), а также выявление эффектов, связанных с динамическим изменением параметров. В реальных лазерных системах преобладающими шумами являются шумы накачки (например, плазмы газового разряда N), флуктуации плотности активной и пассивной сред (b/a), а также тепловые шумы. Так как влияние параметров N и b/a на временные характеристики импульсной генерации лазерного излучения эквивалентно, то для упрощения задачи зашумлению был подвергнут только параметр накачки N [2].

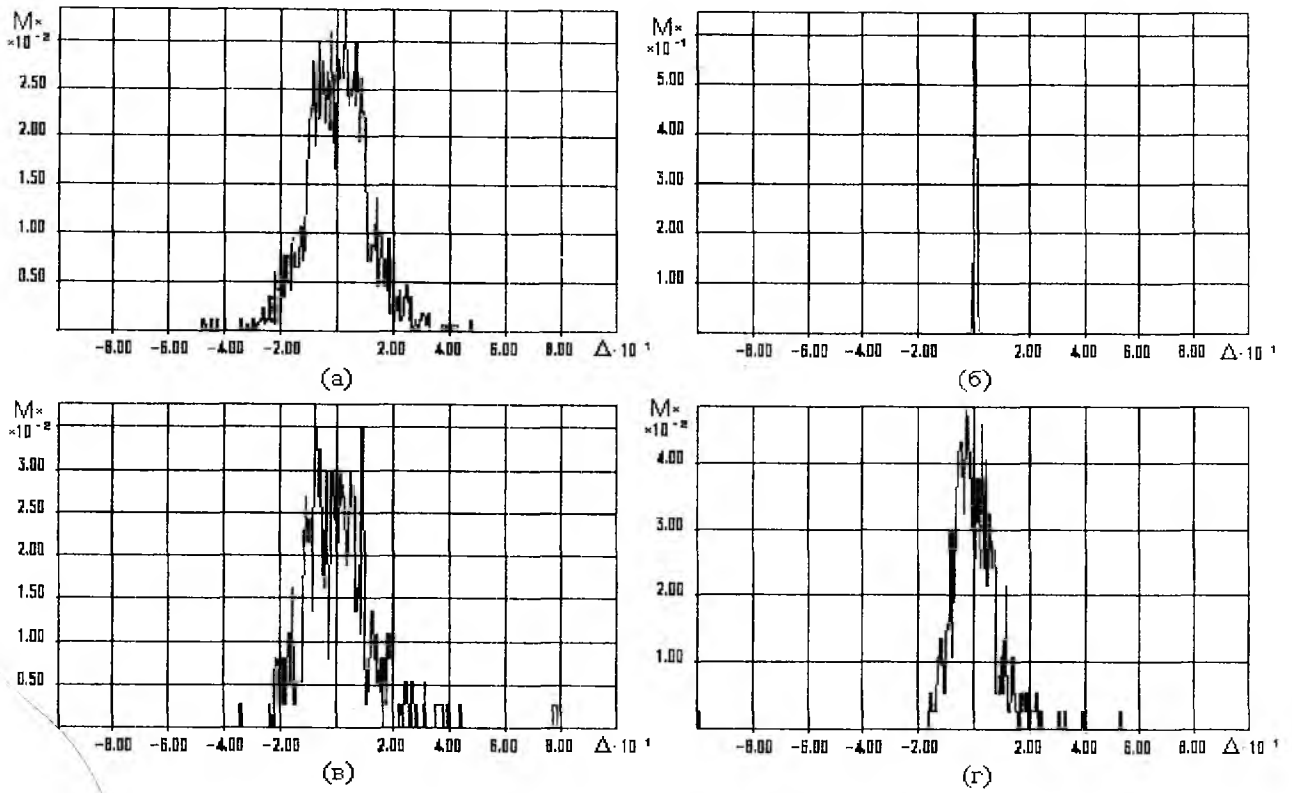


Рис. 5

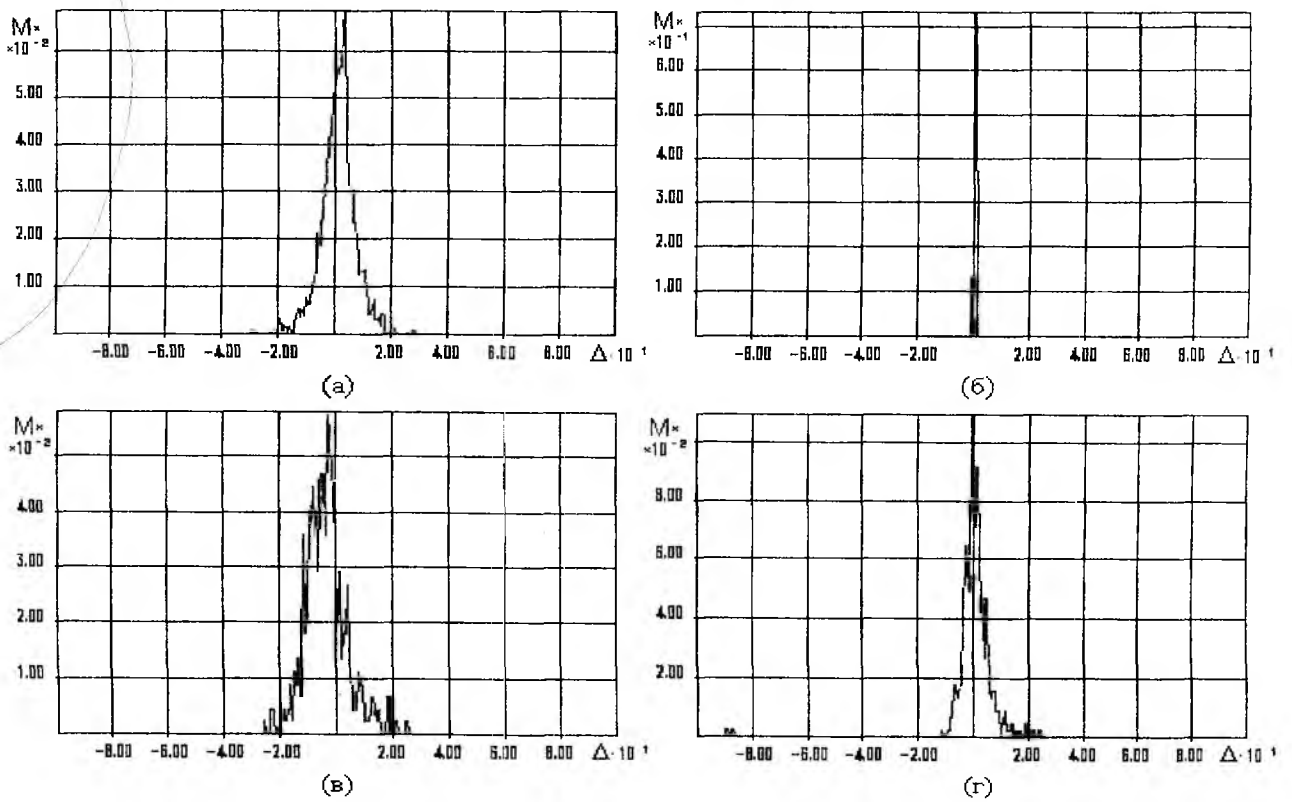


Рис. 6

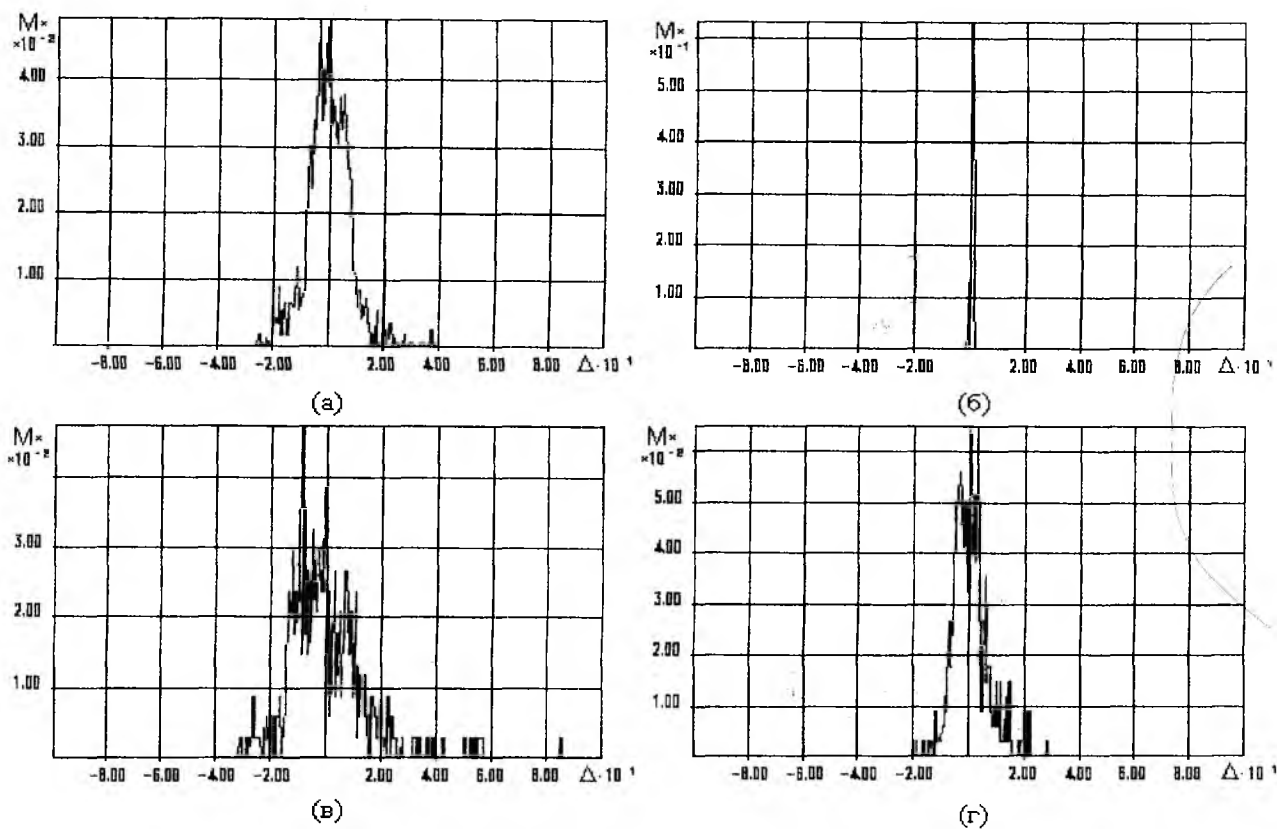


Рис. 7

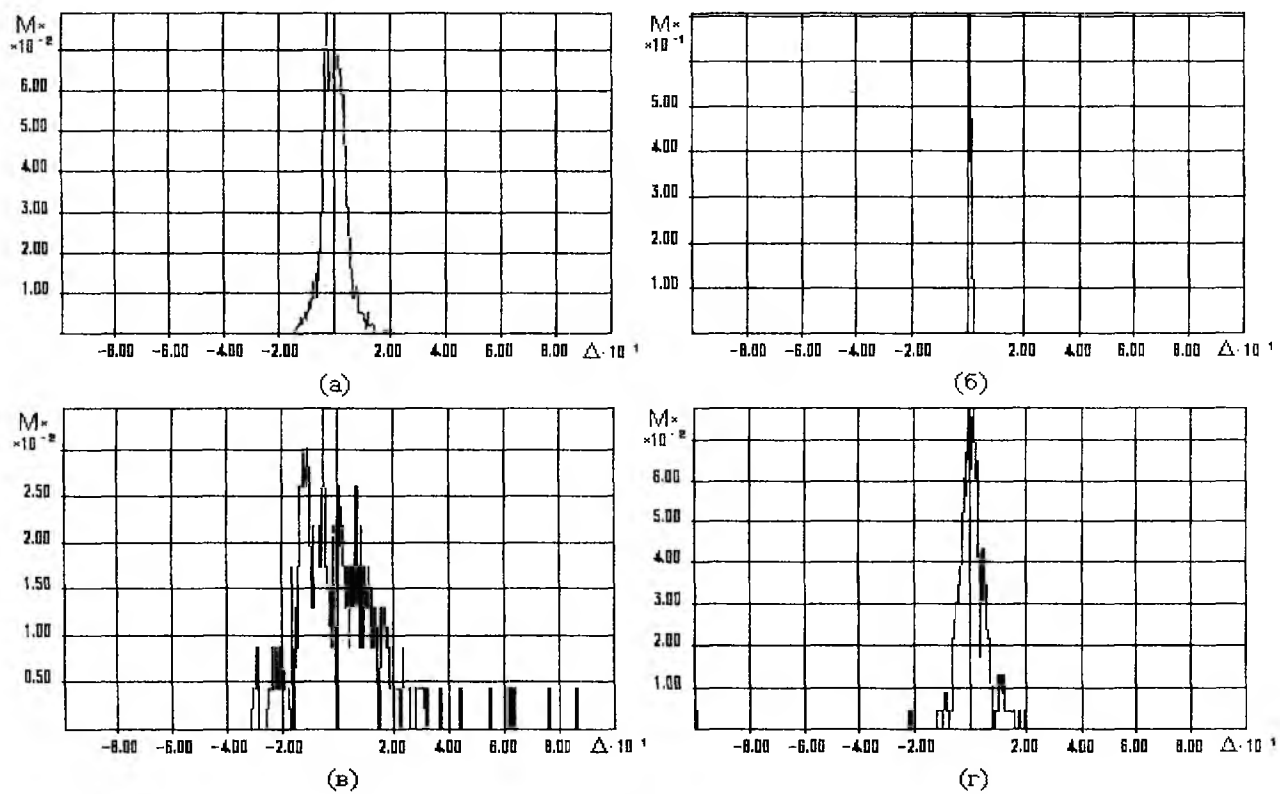


Рис. 8

На рис. 5-8 изображены расчетные статистические распределения параметров N , I_{\max} , $t_{\text{имп}}$, $t_{\text{инт}}$, по величине отклонения от средних значений Δ , а M – отношение плотности количества параметров из выбранного диапазона к общему количеству рассчитанных параметров (функция, пропорциональная распределению плотности вероятности). Рис. (5-8)а – распределение N , рис. (5-8)б – распределение I_{\max} , рис. (5-8)в – распределение $t_{\text{имп}}$, рис. (5-8)г – распределение $t_{\text{инт}}$.

Моделирование проводилось в точках ($b/a=0.5 \div 0.75$), значение N определялось, как среднее арифметическое между значениями, соответствующими границам импульсной области, при значениях $\beta=0.01 \div 0.07$. Диапазон шума $\pm 3\sigma$ при $\sigma=0.01$, вероятность нахождения в заданном диапазоне 0.9997, что вполне достаточно для отображения гауссового шума [2].

Как видно из рис. 5-8, подтверждается предположение о том, что уширение области импульсного режима увеличивает шумовую устойчивость временных характеристик импульсов ($t_{\text{имп}}$, $t_{\text{инт}}$). Кроме того, шум параметра накачки практически не влияет на максимальную интенсивность импульса излучения (I_{\max}).

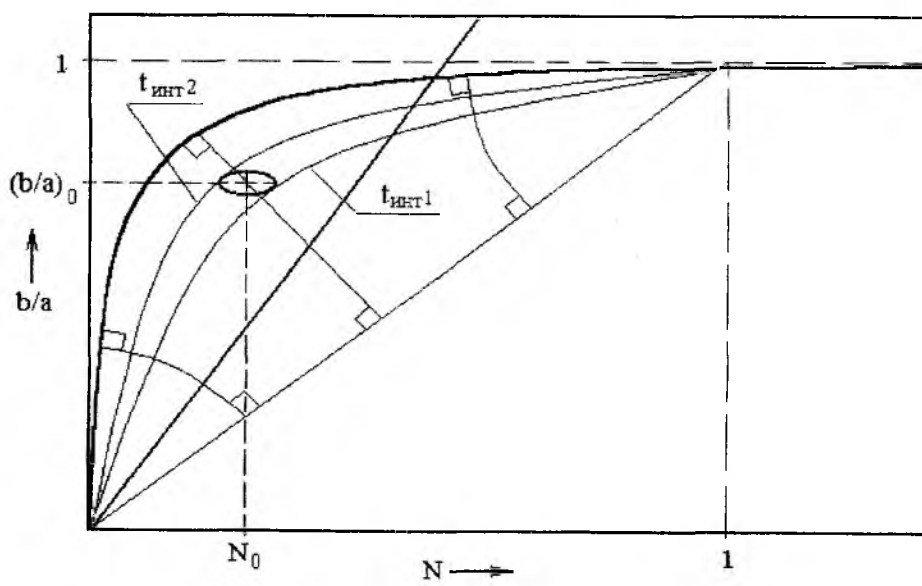


Рис. 9

Полученные распределения (рис. 5-8) при $b/a=0.75$ показывают, что зависимость $t_{\text{инт}}$ имеет меньший разброс при уменьшении области импульсного режима чем $t_{\text{имп}}$, это объясняется тем, что величина $t_{\text{имп}} \ll t_{\text{инт}}$, а величины разбросов $\Delta t_{\text{инт}}$ и $\Delta t_{\text{имп}}$ приблизительно одинаковы. При $b/a=0.5$ разброс $\Delta t_{\text{инт}}$ с уменьшением области импульсного режима несколько уменьшается – это объясняется уменьшением угла между эквиинтервальными линиями и прямой $b/a=\text{const}$ (линия флуктуаций N). Но при существенном уменьшении области либо при увеличении σ , когда $\sigma \approx \Delta N_{\text{обл}}$, разброс $\Delta t_{\text{инт}}$ увеличивается по установленной закономерности. В общем случае (рис. 9, 10) максимальный разброс $t_{\text{имп}}$ и $t_{\text{инт}}$ определяется проекцией эллипса рабочей точки на кривые, ортогональные к эквиинтервальным линиям и линиям одинаковой длительности импульса

Анализируя статистику полученных импульсных последовательностей, обнаружено что временные параметры некоторых импульсов все же выходят за рамки установленной выше закономерности. Хотя их количество в сумме не превышает 1% от общего количества импульсов в последовательности, сам факт их наличия требует анализа. Прежде всего это можно объяснить тем, что основная частота нормального шума, воздействующего на параметр накачки и средняя частота импульсных колебаний были приблизительно равны, в результате локальное распределение плотности вероятности за столь малый период времени

t ($t=t_{\text{инт}} + t_{\text{имп}}$) сильно отличается от заданного. Вследствие такого локального отклонения некоторые импульсы по своим параметрам выходят за рамки закономерностей установленных при постоянных параметрах модели лазера с пассивным затвором.[1]

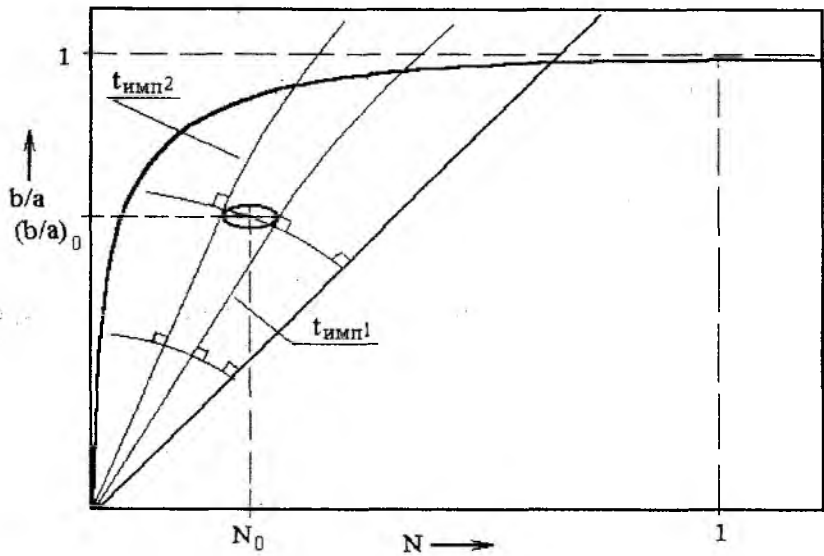


Рис. 10

В процессе исследования кинетической модели лазера с пассивным модулятором [1] была выявлена фундаментальная зависимость. Величина и стабильность частоты следования импульсов связаны между собой таким образом, что увеличивая частоту, можно увеличить стабильность, и наоборот. Зависимость между этими двумя характеристиками определяется шириной импульсной области на диаграмме устойчивости модели, описывающей лазер с пассивным фильтром

Список литературы: 1. Рудченко И.М., Быков М.М Моделирование кинетических процессов в лазерах с нелинейными модуляторами и статическими параметрами // Радиотехника и электроника, 2002. Вып. 124. С. 142 – 147. 2. Филипковский Ю.К. Случайные процессы в радиотехнических цепях // Киев: Изд. объединение «Вища школа», 1978. с. 112.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 22.11.2002