



УДК 621.373.8:004.94
ГРНТИ 78.27.49

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО СРЕДСТВА В ПРЕДГЕНЕРАЦИОННОМ РЕЖИМЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*Ю.Л. КОЗИРАЦКИЙ, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.В. ПРОХОРОВ, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Разработана компьютерная модель передающего лазерного средства в предгенерационном режиме функционирования, позволяющая качественно оценить выходную интенсивность спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения для различных энергетических переходов в активном элементе для передающих каналов лазерных средств с четырехуровневой схемой генерации. Применение преобразования Лапласа к кинетическим уравнениям, описывающим процессы возникновения спонтанного и спонтанно-индуцированного излучения на этапе накачки, позволило рассмотреть процесс образования и усиления излучения с точки зрения теории автоматизации, представив его в виде динамической системы взаимосвязанных между собой инерционных звеньев с соответствующими передаточными функциями, и провести компьютерное моделирование полученной таким образом системы на ЭВМ.

Ключевые слова: компьютерная модель, лазер, передаточная функция, спонтанное излучение, активный элемент, интенсивность, предгенерационный режим.

COMPUTER MODEL OF THE TRANSMITTING LASER MEANS IN THE PRE-GENERATION FUNCTIONING MODE

*YU.L. KOZIRATSKIY, Doctor of Technical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
D.V. PROKHOROV, Candidate of Technical sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

A computer model of the transmitting laser means in the pre-generation mode of operation was developed, which allows one to qualitatively evaluate the output intensity of spontaneous (spontaneously induced) radiation for various energy transitions in the active element for the transmitting channels of laser means with a four-level generation scheme. The application of the Laplace transform to kinetic equations describing the processes of occurrence of spontaneous and spontaneously induced radiation at the pumping stage made it possible to consider the process of radiation generation and amplification from the point of view of automation theory, representing it as a dynamic system of interconnected inertial links with corresponding transfer functions, and to conduct computer simulation of the computer system thus obtained.

Keywords: computer model, laser, transfer function, spontaneous emission, active element, intensity, pre-generation mode.

Введение. В части исследования внеполосных и побочных излучений лазерных средств особый интерес представляет рассмотрение вопросов образования и использования при ведении разведки спонтанного и спонтанно-индуцированного излучений передающих каналов [1, 2, 3]. Так наличие в предгенерационном режиме функционирования лазера спонтанного многочастотного излучения, предшествующего по времени основному (гигантскому импульсу), может использоваться при решении задач упреждающего информационного обеспечения.



Актуальность. На основе и в развитии предложенного авторами методического подхода к построению компьютерных моделей процессов образования внеполосных и побочных излучений в передающих лазерных средствах, базирующегося на использовании передаточных функций, рассмотрим процесс образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения передающим каналом лазерного средства с разработкой соответствующей компьютерной модели.

Основу аналитических моделей процессов формирования побочного и распространения основного излучения в лазерных средствах составляет оптико-энергетическая (структурная) модель лазерного средства. Она представляет собой оптическую схему и оптические характеристики передающего канала лазерного средства с тем или иным типом модулятора добротности резонатора и структуру энергетических уровней и переходов, обеспечивающих генерацию основного и побочного излучений, с их характеристиками (параметрами) [1, 4, 5].

Оптические схемы передающих каналов существующих и перспективных лазерных средств, как правило, однотипны. Отличие их состоит в типе передающей оптической системы и модулятора добротности резонатора, в форме и геометрических размерах активного элемента.

В существующих лазерных средствах локации используются твердотельные (кристаллические) активные элементы, имеющие цилиндрическую форму с шероховатой боковой поверхностью и полированными с высокой точностью торцами, перпендикулярными оптической оси кристалла [6, 7].

В качестве активных элементов наиболее широкое применение нашли кристаллы, активированные трехвалентными редкоземельными элементами (как правило, неодимом). Диаграмма уровней в кристалле алюмоиттриевого граната (АИГ) представлена на рисунке 1. Все излучательные переходы в АИГ осуществляются с уровня 3 ($4F_3 3/2$) неодима на уровни 2.1 ($4I 9/2$), 2.2 ($4I 11/2$), 2.3 ($4I 13/2$), 2.4 ($4I 15/2$).

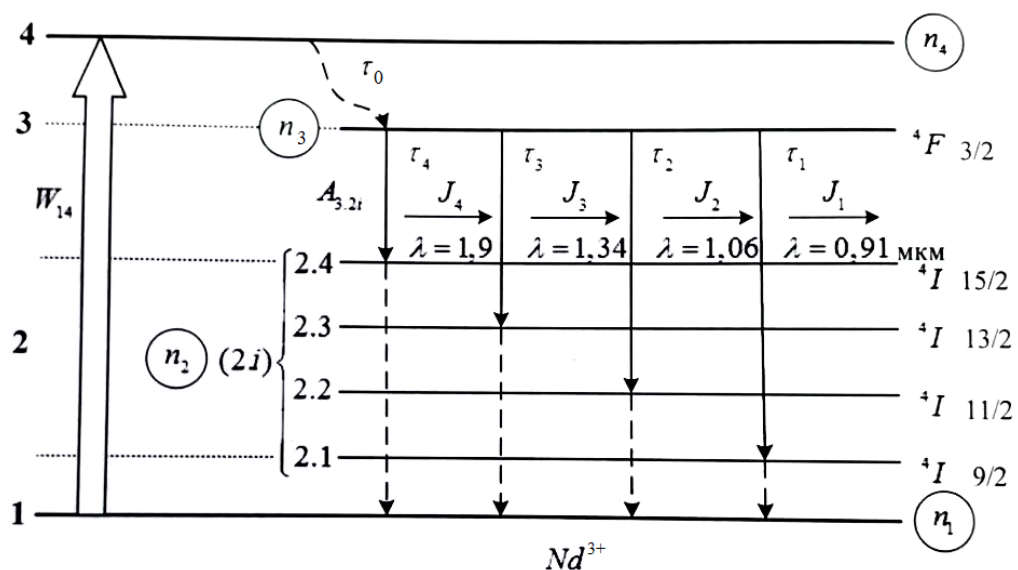


Рисунок 1 – Диаграмма уровней энергии в кристалле АИГ и основных переходов при накачке и генерации лазерного излучения

На этапе накачки передающего канала лазерного средства спонтанное излучение будет иметь достаточно широкий спектральный состав с явно выраженными максимумами на длинах волн 0,91; 1,06; 1,34 и 1,9 мкм, обусловленных переходами $3 \rightarrow 2.1$, $3 \rightarrow 2.2$, $3 \rightarrow 2.3$ и $3 \rightarrow 2.4$ соответственно. Поэтому при аналитическом описании процесса формирования спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения на этапе накачки должны рассматриваться все названные переходы одновременно.



При описании процессов распространения спонтанного излучения в резонаторе целесообразно рассмотреть две составляющие потока фотонов: J_i^+ – поток фотонов в направлении оси x и J_i^- – поток фотонов в направлении, противоположном оси x [1, 2]. Здесь и далее под i будем понимать соответствующий энергетический переход $3 \rightarrow 2.i$, где $i = 1, 2, 3, 4$.

Процессы распространения спонтанного излучения в резонаторе до момента включения его высокой добротности поясняет схема, представленная на рисунке 2.

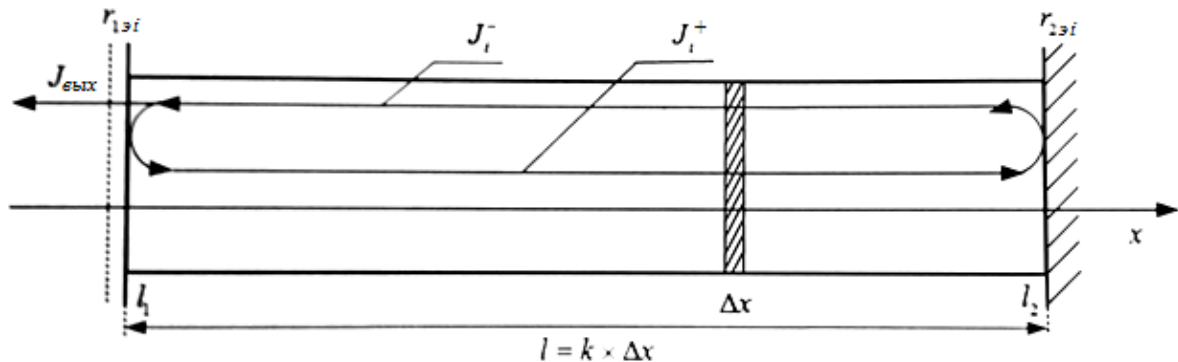


Рисунок 2 – Схема распространения излучения в передающем канале лазерного средства до включения высокой добротности резонатора

Процесс образования и усиления спонтанного излучения для каждого из переходов, представленных на рисунке 1, описывается кинетическими уравнениями для интенсивностей прямой и обратной волны излучения. Как показано в [1, 4], для интенсивности спонтанного излучения в прямом направлении, соответствующего i -му энергетическому переходу, можно записать следующее выражение:

$$\frac{\partial J_{ci}^+}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{ci}^+}{\partial t} = \delta \cdot A_{3,2.i} \cdot n_3, \quad (1)$$

где J_{ci}^+ – интенсивность спонтанного излучения, соответствующего i -му энергетическому переходу (число спонтанно излученных фотонов, проходящих через 1 см^2 в единицу времени); n_3 – плотность заселенности уровня 3; $A_{3,2.i}$ – вероятность спонтанного перехода между уровнями $3 \rightarrow 2.i$ в единицу времени; U – скорость распространения излучения в активном элементе.

Аналогичное выражение можно записать для интенсивности излучения в обратном направлении (обратной волны):

$$-\frac{\partial J_{ci}^-}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{ci}^-}{\partial t} = \delta \cdot A_{3,2.i} \cdot n_3. \quad (2)$$

Спонтанное излучение в зависимости от знака и величины плотности инверсной населенности i -го энергетического перехода может усиливаться за счет индуцированных переходов и поглощаться в активном элементе с изменением заселенности рассматриваемых энергетических уровней или без изменения их заселенности (например, поглощение в примесях с изменением температуры активного элемента).

В этом случае для индуцированного излучения в прямом и обратном направлениях можно записать следующие уравнения:



$$\frac{\partial J_{U_i}^+}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{U_i}^+}{\partial t} = [\sigma_{3,2,i} \Delta_i - \beta_i] (J_{ci}^+ + J_{U_i}^+); \quad (3)$$

$$-\frac{\partial J_{U_i}^-}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{U_i}^-}{\partial t} = [\sigma_{3,2,i} \Delta_i - \beta_i] (J_{ci}^- + J_{U_i}^-), \quad (4)$$

где σ_i – поперечное сечение i -го перехода;

Δ_i – плотность инверсной населенности между уровнями 3 и 2. i ($\Delta_i = n_3 - n_{2,i}$);

β_i – показатель потерь.

Складывая уравнения (1) и (3), а также (2) и (4), получим:

$$\frac{\partial J_{i\Sigma}^+}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{i\Sigma}^+}{\partial t} = [\sigma_{3,2,i} \Delta_i - \beta_i] J_{i\Sigma}^+ + \delta \cdot A_{3,2,i} \cdot n_3; \quad (5)$$

$$-\frac{\partial J_{i\Sigma}^-}{\partial x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{i\Sigma}^-}{\partial t} = [\sigma_{3,2,i} \Delta_i - \beta_i] J_{i\Sigma}^- + \delta \cdot A_{3,2,i} \cdot n_3. \quad (6)$$

Связь между уравнениями (5) и (6), как следует из рисунка 2, определяется выражением:

$$J_{i\Sigma}^+(t, l_1) = J_{i\Sigma}^-(t, l_1) \cdot r_{1\rightarrow i}; J_{i\Sigma}^-(t, l_1) = J_{i\Sigma}^+(t, l_2) \cdot r_{2\rightarrow i}. \quad (7)$$

Интенсивность на выходе передающего канала до включения высокой добротности резонатора определяется из выражения:

$$J_{\text{вых}i} = J_{i\Sigma}^-(1 - r_{1\rightarrow i}), \quad (8)$$

где $r_{1\rightarrow i}$ – эквивалентный коэффициент отражения излучения на частоте ν_i (по совокупности отражений торца активного элемента и первого зеркала);

$r_{2\rightarrow i}$ – эквивалентный коэффициент отражения излучения на частоте ν_i вторым зеркалом и торцом активного элемента.

Для определения выходной интенсивности излучения энергетического перехода 3→2. i должны быть известны: плотность заселенности уровня 3 и разность плотностей инверсной населенности уровнями 3 и 2. i (Δ_i). С учетом диаграммы переходов, представленной на рисунке 1, а также крайне малого времени жизни частиц на втором и четвертом уровнях можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= W_{14} (n_{10} - n_3) - n_3 \sum_i A_{3,2,i} - \sum_i \sigma_{3,2,i} \Delta_i J_i; \\ \sum_i \frac{dn_{2,i}}{dt} &= \sum_i \{ (A_{3,2,i} n_3 + \sigma_{3,2,i} \Delta_i J_i) - \omega_{2,i,1} n_{2,i} \}; J_i = J_{i\Sigma}^+ + J_{i\Sigma}^-, \end{aligned} \quad (9)$$

где n_{10} – общее число активных частиц, находящихся на первом уровне;

W_{14} – вероятность вынужденного перехода из состояния 1 в состояние 4;

$\omega_{i,j}$ – вероятность безызлучательного перехода в единицу времени.



Для рассматриваемого активного элемента начальное условие для плотности инверсной населенности имеет вид:

$$\Delta_i(0, x) = 0, \quad (10)$$

то есть в начальный момент времени $\Delta_i = n_3 - n_{2,i} \approx n_3$ (процесс накачки медленней, чем безызлучательные переходы).

Выражения (5–10) достаточно полно описывают процессы возникновения спонтанного и спонтанно-индуцированного излучения на этапе накачки, а также, в конечном итоге, обеспечивают получение количественных значений выходной интенсивности спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения различных энергетических переходов в активном элементе.

Решение системы кинетических уравнений (5–10) для получения количественных значений выходной интенсивности спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения представляет собой сложную и трудоемкую задачу, что определяет необходимость воспользоваться предложенным в [3] подходом и рассмотреть моделируемый процесс образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения с точки зрения теории автоматики [8] – представить его в виде динамической системы взаимосвязанных между собой инерционных звеньев с соответствующими передаточными функциями.

Структурно общую схему процесса образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения передающим каналом лазерного средства в форме передаточных функций представлена на рисунке 3.

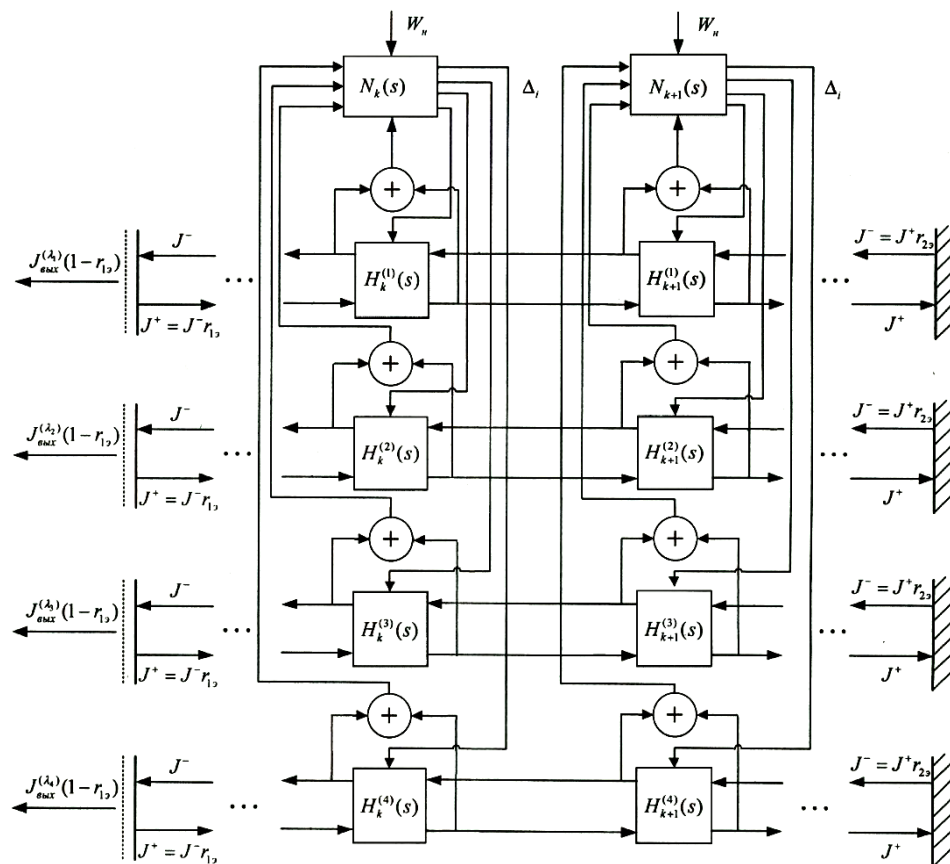


Рисунок 3 – Структурная схема процесса образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения передающим каналом лазерного средства



На схеме представлен резонатор, состоящий из двух зеркал с помещенным в него активным элементом, в котором распространяется излучение в прямом J^+ и обратном направлении J^- на длинах волн $\lambda_1 = 0,91$; $\lambda_2 = 1,06$; $\lambda_3 = 1,34$ и $\lambda_4 = 1,9$ мкм, зависящее от знака и величины плотности инверсной населенности i -го энергетического перехода Δ_i и наоборот.

Динамика процесса распространения излучения в активном элементе в прямом и обратном направлениях на соответствующих длинах волн излучения λ представлена в форме передаточных функций $H_k^{(\lambda)}(s)$. Динамику процесса изменения плотности инверсной населенности между уровнями 3 и 2. i (Δ_i) под воздействием энергии накачки (скорость накачки $W_n = W_{14}$) описывают передаточные функции $N_k(s)$.

Рассмотрим активный элемент передающего канала лазерного средства длиной l , продольная ось которого совмещена с осью x , а ее начало – с началом координат. Выделим в кристалле элементарный объем, ограниченный элементом длиной Δx (рисунок 2). Тогда распространение индуцированного излучения в элементарном объеме можно представить в виде инерционных звеньев, показанных на рисунке 4.



Рисунок 4 – Инерционные звенья распространения индуцированного излучения в элементарном объеме активного элемента: а) в прямом направлении; б) в обратном направлении

Интенсивность индуцированного излучения в прямом направлении в соответствии с выражением (5) можно записать в следующем виде:

$$\frac{J_{i\text{ вых}}^+ - J_{i\text{ вх}}^+}{\Delta x} + \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial J_{i\text{ вых}}^+}{\partial t} = [\sigma_{3,2,i} \Delta_i - \beta] J_{i\text{ вх}}^+ \quad (11)$$

Применяя свойства преобразования Лапласа (дифференцирование оригинала и преобразование произведения оригиналов), выражение (11) можно записать в виде:

$$J_{i\text{ вых}}^+(s) - J_{i\text{ вх}}^+(s) + \frac{\Delta x}{U} \cdot s \cdot J_{i\text{ вых}}^+(s) = \Delta x \sigma_{3,2,i} \Delta_i(s) * J_{i\text{ вх}}^+(s) - \Delta x \beta J_{i\text{ вх}}^+(s), \quad (12)$$

где $J_{i\text{ вх}}^+(s)$ и $J_{i\text{ вых}}^+(s)$ – преобразование Лапласа для входного и выходного сигнала звена соответственно;

* – обозначение свертки в области преобразования Лапласа $\Delta_i(s) * J_{i\text{ вх}}^+(s) = L_s \{ \Delta_i(t) J_{i\text{ вх}}^+(t) \}$.

Проведя преобразования выражения (12) и вводя частные передаточные функции $H_{k1}^+(s)$ и $H_{k2}^+(s)$ звена распространения индуцированного излучения в прямом направлении в элементарном объеме длиной Δx , окончательно получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} J_{i\text{ вых}}^+(s) &= J_{i\text{ вх}}^+(s) \cdot U \cdot \frac{\frac{1}{U} - \beta}{\Delta x + s} + \Delta_i(s) * J_{i\text{ вх}}^+(s) \cdot U \cdot \frac{\sigma_{3,2,i}}{\Delta x + s} = \\ &= J_{i\text{ вх}}^+(s) \cdot H_{k1}^+(s) + \Delta_i(s) * J_{i\text{ вх}}^+(s) \cdot H_{k2}^+(s). \end{aligned} \quad (13)$$



Проводя аналогичные рассуждения и математические преобразования с учетом допущения о независимости свойств элементарного объема Δx активного элемента от направления излучения, получим выражение для случая распространения индуцированного излучения в обратном направлении:

$$J_{i \text{ вьлх}}^-(s) = J_{i \text{ вх}}^-(s) \cdot U \cdot \frac{1 - \beta}{\frac{U}{\Delta x} + s} + \Delta_i(s) * J_{i \text{ вх}}^-(s) \cdot U \cdot \frac{\sigma_{3,2,i}}{\frac{U}{\Delta x} + s} =$$

$$= J_{i \text{ вх}}^-(s) \cdot H_{k1}^-(s) + \Delta_i(s) * J_{i \text{ вх}}^-(s) \cdot H_{k2}^-(s) \quad (14)$$

Таким образом, рассматривая процесс распространения индуцированного излучения в активном элементе передающего канала лазерного средства с точки зрения теории автоматики, получены передаточные функции звеньев распространения индуцированного излучения в элементарном объеме активного элемента, распространяющегося в прямом и обратном направлениях.

Плотность заселенности уровня 3 в элементарном объеме активного элемента для индуцированного излучения согласно выражению (9) можно записать:

$$\frac{dn_3}{dt} = W_{14}(n_{10} - n_3(t)) - \sum_i A_{3,2,i} n_3(t) - \sum_i [\sigma_{3,2,i} J_i(t) \Delta_i(t)], \quad (15)$$

где $J_i(t) = J_{i\Sigma}^+(t) + J_{i\Sigma}^-(t)$.

Применяя свойства преобразования Лапласа, выражение (15) можно записать в виде:

$$sn_3(s) - n_3(0) = W_{14}n_{10} - W_{14}n_3(s) - \sum_i A_{3,2,i}n_3(s) - \sum_i [\sigma_{3,2,i}J_i(s) * \Delta_i(s)]. \quad (16)$$

Откуда, выражая $n_3(s)$ (с учетом $n_3(0) = 0$) и вводя частные передаточные функции $N_{k1}(s)$ и $N_{k2}(s)$, получим:

$$n_3(s) = \frac{W_{14}n_{10}}{s + W_{14} + \sum_i A_{3,2,i}} - \frac{\sum_i [\sigma_{3,2,i}\Delta_i(s) * J_i(s)]}{s + W_{14} + \sum_i A_{3,2,i}} = N_{k1}(s)n_{10} - N_{k2}(s) \cdot \Delta(s) * J(s). \quad (17)$$

Выражение (17) является передаточной функцией изменения плотности инверсной населенности в элементарном объеме активного элемента, согласно структурной схеме (рисунок 3) $n_3(s) = \Delta(s) = N_k(s)$, так как для четырехуровневой схемы генерации $n_3(t) \approx \Delta(t)$.

Рассмотрим модель процесса образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения передающим каналом лазерного средства на длине волны излучения λ в активном элементе длиной $l = k \times \Delta x$, учитывая физику процесса распространения излучения в передающем канале согласно схеме, представленной на рисунке 2. Динамическую модель данного процесса в форме передаточных функций можно представить в виде, показанном на рисунке 5.

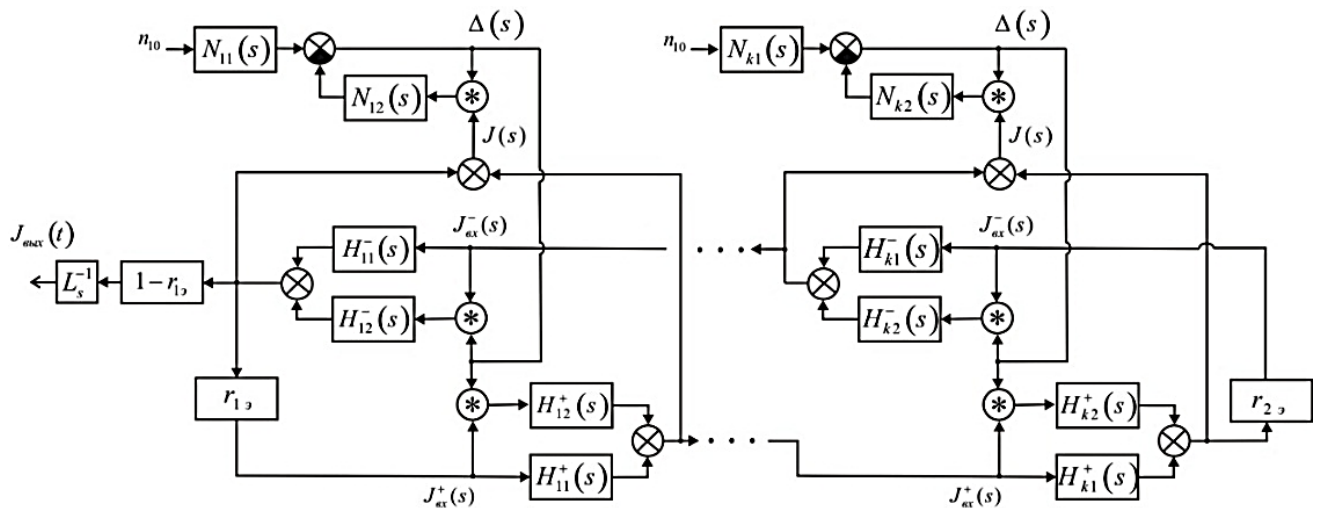


Рисунок 5 – Модель процесса образования и усиления спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения передающим каналом лазерного средства на длине волны излучения λ в форме передаточных функций

Предложенный подход в решении поставленной задачи удобен при компьютерном моделировании, в частности, при использовании среды моделирования динамических объектов Simulink из состава универсального языка технических вычислений MATLAB.

Реализация динамической модели в среде Simulink, в которой активный элемент длиной l разбит на $k=2$ элементарных объема длиной Δx , представлена на рисунке 6.

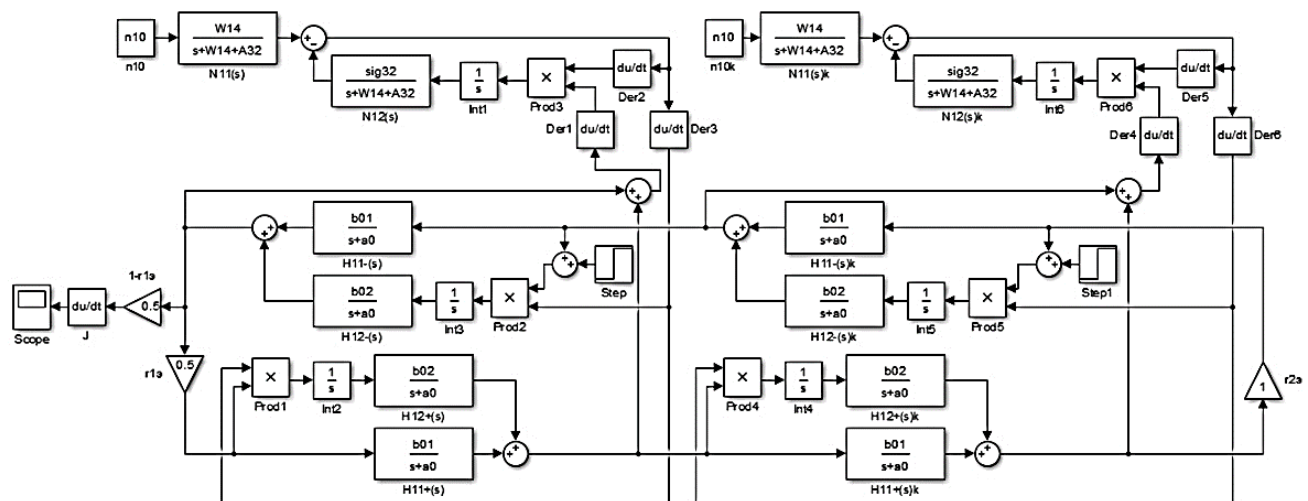


Рисунок 6 – Реализация модели в среде MATLAB (Simulink) $l = 2 \times \Delta x$

Передаточные функции реализовывались в виде соответствующих инерционных звеньев, параметры которых можно определить в соответствии с параметрами (характеристиками) активного элемента и задать в соответствующих полях параметров блоков Transfer Fcn. Эквивалентные коэффициенты отражения излучения от зеркал и торцов активного элемента $r_{1,i}$ и $r_{2,i}$ задавались блоками Gain с параметрами соответственно 0,5 и 1.

В качестве генератора входного воздействия использовался генератор ступенчатого сигнала (Step). Выход полученной схемы подключался к осциллографу (Scope), показания которого соответствовали искомой интенсивности излучения от времени t . На рисунке 7 представлены графики зависимостей выходной интенсивности спонтанного (спонтанно-



индуцированного) излучения от времени t , полученные на выходе схемы по показаниям осциллографа. Зависимости построены при различных уровнях накачки $W_{14} = 1$ и 2 с^{-1} для следующих исходных данных: $U = 1,65 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$; $n_{10} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^3$; $l = 6 \text{ см}$; $\beta = 0,005 \text{ см}^{-1}$; $\sigma_{32} = 5,6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$; $A_{32} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $r_{1\partial i} = 0,5$; $r_{2\partial i} = 1$ [4, 5].

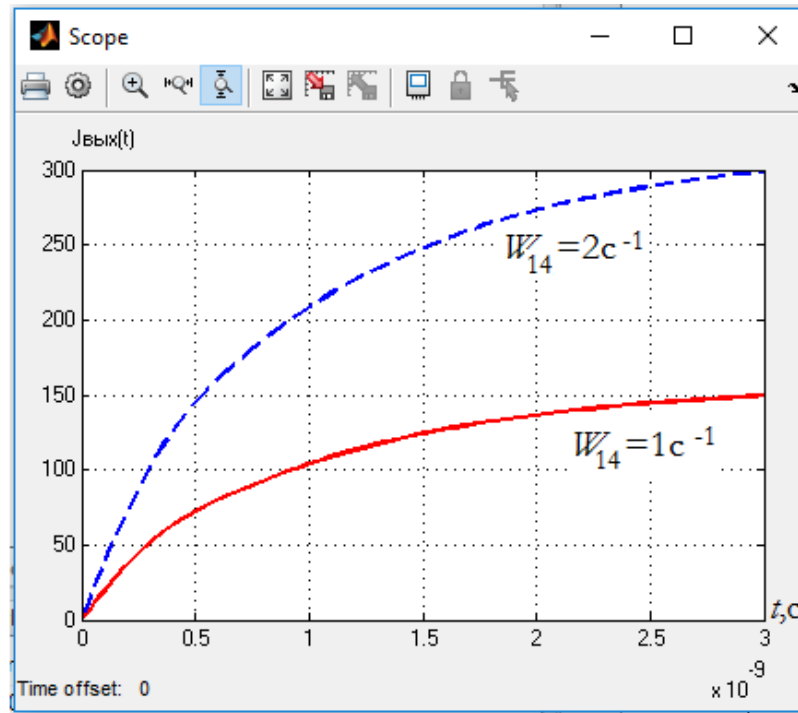


Рисунок 7 – Графики зависимости $J_{\text{вых}}(t)$ при различных уровнях накачки W_{14}

Полученные графики позволяют оценить выходную интенсивность спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения для энергетического перехода в активном элементе до момента достижения пороговой плотности инверсной населенности активного элемента при различных уровнях накачки W_{14} .

Выводы. Таким образом, применение преобразования Лапласа к кинетическим уравнениям, описывающим процессы возникновения спонтанного и спонтанно-индуцированного излучения на этапе накачки, позволило рассмотреть процесс образования и усиления с точки зрения теории автоматики и представить его в виде динамической системы взаимосвязанных между собой инерционных звеньев с соответствующими передаточными функциями, и в последующем провести компьютерное моделирование полученной таким образом системы на ЭВМ.

Разработанная динамическая модель позволяет качественно оценить выходную интенсивность спонтанного (спонтанно-индуцированного) излучения для различных энергетических переходов в активном элементе для передающих каналов лазерных средств с четырехуровневой схемой генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козирацкий, Ю.Л. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов: Ю.Л. Козирацкий, А.Ю. Козирацкий, Д.В. Прохоров и др.; под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.



2. Козирацкий, А.Ю. Модель процесса формирования предгенерационного спонтанного излучения в передающих устройствах лазерных средств с модуляцией добротности резонатора / А.Ю. Козирацкий, А.В. Кусакин // Вестник ВИРЭ. 2005. № 3. Выпуск № 1. С. 172–182.
3. Козирацкий, А.Ю. Компьютерное моделирование процесса формирования предгенерационных спонтанных излучений лазерными средствами с модуляцией добротности резонатора / А.Ю. Козирацкий, В.М. Коровин, А.В. Кусакин, В.И. Подлужный, З.Б. Федукевич, А.В. Иванцов // Вестник военного института. №1 (5). 2006. С. 42–48.
4. Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. Оптические генераторы на твердом теле. М.: Советское радио, 1967. 384 с.
5. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шокин. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.
6. Климков, С.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами / Климков С.М. М.: Сов. радио, 1978. 264 с.
7. Сидорин В.М. Лазеры в авиации / В.М. Сидорин, В.П. Кутахов, И.М. Сухарь. М.: Воениздат, 1982. 171 с.
8. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». М.: Высшая школа, 1990. 335 с.

REFERENCES

1. Kozirackij, Yu.L. Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-`elektronnyh sredstv, ocenka parametrov ih signalov: Yu.L. Kozirackij, A.Yu. Kozirackij, D.V. Prohorov i dr.; pod red. Yu.L. Kozirackogo. M.: Radiotekhnika, 2015. 456 p.
2. Kozirackij, A.Yu. Model' processa formirovaniya predgeneracionnogo spontannogo izlucheniya v peredayuschih ustrojstvah lazernyh sredstv s modulyaciej dobrotnosti rezonatora / A.Yu. Kozirackij, A.V. Kusakin // Vestnik VIR`E. 2005. № 3. Vypusk № 1. pp. 172–182.
3. Kozirackij, A.Yu. Komp'yuternoe modelirovanie processa formirovaniya predgeneracionnyh spontannyh izluchenij lazernymi sredstvami s modulyaciej dobrotnosti rezonatora / A.Yu. Kozirackij, V.M. Korovin, A.V. Kusakin, V.I. Podluzhnyj, Z.B. Fedukovich, A.V. Ivancov // Vestnik voennogo instituta. №1 (5). 2006. pp. 42–48.
4. Mika`elyan A.L., Ter-Mikaelyan M.L., Turkov Yu.G. Opticheskie generatory na tverdom tele. M.: Sovetskoe radio, 1967. 384 p.
5. Lazery na alyumoittriovom granate s neodimom / G.M. Zverev, Yu.D. Golyaev, E.A. Shalaev, A.A. Shokin. M.: Radio i svyaz', 1985. 144 p.
6. Klimkov, S.M. Osnovy rascheta optiko-`elektronnyh priborov s lazerami / Klimkov S.M. M.: Sov. radio, 1978. 264 p.
7. Sidorin V.M. Lazery v aviicii / V.M. Sidorin, V.P. Kutahov, I.M. Suhar'. M.: Voenizdat, 1982. 171 p.
8. Konovalov G.F. Radioavtomatika: Ucheb. dlya vuzov po spec. «Radiotekhnika». M.: Vysshaya shkola, 1990. 335 p.

© Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В., 2019

Козирацкий Юрий Леонтьевич, доктор технических наук, профессор, профессор 51 кафедры радиоэлектронной борьбы (и технического обеспечения частей РЭБ), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, urleo@bk.ru.

Прохоров Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент 51 кафедры радиоэлектронной борьбы (и технического обеспечения частей РЭБ), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, dvp2201@rambler.ru.