

А. Н. Шемякин¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., shemyakin@lantanlaser.ru,
М. Ю. Рачков², д-р техн. наук, проф., michyur@gmail.com,
Н. Г. Соловьев¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., solovyov@lantanlaser.ru,
М. Ю. Якимов¹, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., yakimov@lantanlaser.ru,
М. А. Котов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., kotov@ipmnet.ru,
¹ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
² Московский государственный политехнический университет, г. Москва

Определение динамических характеристик системы управления мощностью излучения технологических CO₂-лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом

Исследована автоматическая система управления мощностью излучения лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом на примере технологических лазеров серии "Лантан", которые предназначены для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов в составе лазерных технологических комплексов. Мощность лазерного излучения является одним из важнейших параметров лазера, определяющих его технологические возможности. Мощность излучения управляется путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц. Экспериментально получена переходная характеристика лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом. Лазерное излучение подается на термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС, которое измеряет его мощность. После предварительного усиления дифференциальный сигнал с зеркала-приемника регистрируется цифровым запоминающим осциллографом. Установлено запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления. Запаздывание составляет 1487 мкс и объясняется тем, что для первоначальной накачки газового объема до начала генерации излучения необходимо несколько импульсов ионизации. Начальный участок переходной характеристики и затухающие колебания объясняются наличием защитного дросселя в схеме подключения источника основного разряда. Дроссель замедляет рост тока при контракции (коротком замыкании) разряда, позволяя автоматическим выключателям отключить электропитание. Для моделирования переходного процесса применяется переходная характеристика колебательного звена. Проведена фильтрация исходного сигнала для удаления помех, которые не позволяют сразу определить параметры переходной характеристики. Для определения спектра переходной характеристики проведено прямое быстрое преобразование Фурье, вырезаны гармоники, вносящие помехи и проведено обратное быстрое преобразование Фурье. По переходной характеристике, полученной после фильтрации, определены параметры моделирующей переходной характеристики. На основе параметров переходной характеристики вычислена передаточная функция лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом, что позволяет перейти к расчету оптимального регулятора мощности излучения, обеспечивающего наилучшее качество переходного процесса.

Ключевые слова: технологический лазер, несамостоятельный тлеющий разряд, частота импульсов ионизации, система управления, мощность лазера, переходная характеристика, фильтрация помех, быстрое преобразование Фурье, передаточная функция

Введение

Мощные технологические CO₂-лазеры предназначены для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов в составе лазерных технологических комплексов. Эти комплексы представляют собой сложные технические системы, поэтому автоматизация управления является необходимым условием для их использования на производстве. Одним из самых распространенных способов получения активной среды технологических лазеров является газовый разряд [1]. Использование несамостоятельного тлеющего разряда (НТР), в котором функции ионизации газа и вклада энергии в разряд разделены между двумя источниками, позволило добиться значительного прогресса в области создания мощных CO₂-лазеров. В НТР функции создания проводимости плазмы (создания электронов) и вклада энергии в разряд разделены между двумя различными типами разрядов. Ионизация (проводимость)

обеспечивается внешним ионизатором, а вклад энергии — прохождением тока основного разряда через плазму с концентрацией электронов, задаваемой ионизацией. Существуют три основные схемы организации НТР, используемых в лазерах: с ионизацией электронным пучком [2], с импульсной электродной ионизацией [3] и с импульсной емкостной ионизацией [4].

НТР с импульсной емкостной ионизацией обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами несамостоятельных разрядов. В отличие от разряда с ионизацией электронным пучком он не сопровождается рентгеновским излучением и не требует биологической защиты персонала. По сравнению с НТР с импульсной электродной ионизацией существенно упрощается конструкция газоразрядной камеры за счет отсутствия секционирования камеры и балластных резисторов.

НТР с импульсной емкостной ионизацией позволяет легко управлять мощностью лазерного излучения в автоматическом режиме,

обеспечивает высокую оптическую однородность активного объема, стабильность разряда и высокий КПД.

Схема организации разряда

Схема организации НТР с импульсной емкостной ионизацией показана на рис. 1.

В этой схеме импульсное напряжение с генератора импульсов ионизации (ГИИ) подается на дополнительную пару электродов ионизации большой площади, изолированных от плазмы диэлектрическими пластинами. Этот тип вспомогательных разрядов называется емкостным импульсным разрядом. Он характеризуется высокой пиковой мощностью, необходимой для обеспечения равномерной ионизации в разрядном промежутке между диэлектрическими пластинами и относительно низкой средней по времени мощностью. Колебательное возбуждение равномерно ионизированной среды создается стационарным несамостоятельным разрядом, называемым основным разрядом. Постоянное напряжение с источника питания основного разряда (ИПОР) подается на трубчатые металлические электроды (катод и анод), расположенные по краям разрядной камеры. Быстрый поток газа направлен от катода к аноду, перпендикулярно оси оптического резонатора. Остальные две стенки камеры имеют отверстия, чтобы лазерное излучение проходило к наружным зеркалам резонатора. Оптические оси резонатора складываются в Z-образную форму, так что лазерный луч полностью заполняет активный объем.

Первые опыты по стабилизации мощного тлеющего разряда быстроповторяющимися высоковольтными импульсами были сделаны в работах А. Е. Хилла [5]. На экспериментальном лазере "Циклон" [4], разработанном в ИПМех РАН, впервые были проведены исследования НТР с импульсной емкостной ионизацией в камере большого объема в условиях мощной непрерывной лазерной генерации. Этот оригинальный способ организации разряда по-

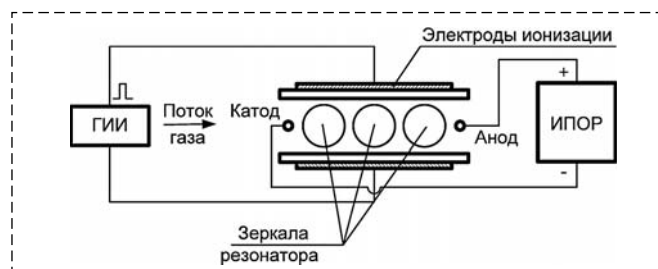


Рис. 1. Схема организации НТР с импульсной емкостной ионизацией

Fig. 1. Nonself-sustained glow discharge system with pulsed capacitive ionization

звляет получить высококачественное однододовое лазерное излучение мощностью до 10 кВт.

На основе исследований, проведенных на лазере "Циклон", были разработаны экспериментальный технологический лазер "Лантан-1", а затем технологический лазер "Лантан-2", предназначенный для промышленного выпуска. Дальнейшим развитием метода импульсной емкостной ионизации стала разработка моноблочного автоматизированного технологического лазера "Лантан-3" [6] и экспериментального технологического лазера с быстрой осевой прокачкой [7], на котором было получено непрерывное излучение мощностью 4 кВт с высоким КПД.

Мощность лазерного излучения (объект управления) является одним из важнейших параметров лазера, определяющих его технологические возможности, например скорость резания [8]. Автоматическая система управления мощностью излучения лазера (далее система управления) должна обеспечивать динамические и статические характеристики, в соответствии с заданными требованиями к качеству регулирования [9].

Динамические свойства системы можно определить по ее экспериментальной переходной характеристике. На ее основе строится модель объекта управления, определяются его передаточная функция и частотные характеристики. Зная модель объекта, можно синтезировать регулятор системы управления, обеспечивающий заданные требования к качеству регулирования. Полученное качество регулирования проверяется и, при необходимости, регулятор настраивается экспериментальным путем.

Мощность излучения лазера с НТР с импульсной емкостной ионизацией управляется путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц [10, 11].

Экспериментальное получение переходной характеристики объекта управления

Структурная схема системы управления приведена на рис. 2.

Схема включает передаточную функцию объекта управления $W_o(s)$ и передаточную функцию регулятора $W_r(s)$, а также коэффициент передачи

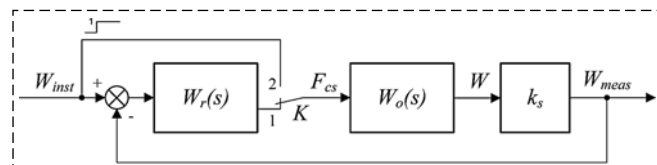


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Fig. 2. Block diagram of the control system

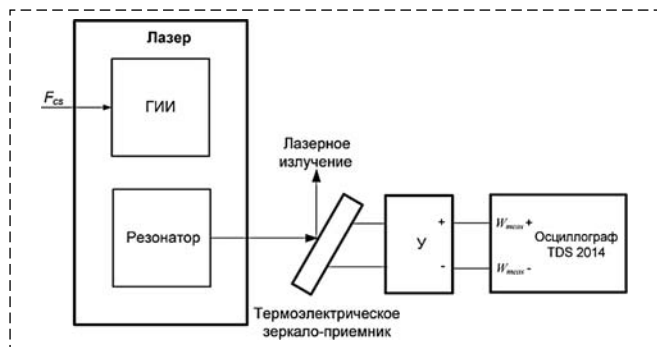


Рис. 3. Схема эксперимента

Fig. 3. Experimental setup

датчика мощности k_s . На вход элемента сравнения подается установленная мощность лазерного излучения W_{insr} . На другой вход элемента сравнения поступает измеренная мощность лазерного излучения W_{meas} . Реальная мощность лазерного излучения W измеряется термоэлектрическим зеркалом-приемником [12]. Элемент сравнения вычисляет сигнал ошибки и подает его на регулятор. Сигнал F_{cs} управляет частотой ионизации, что приводит к соответствующему изменению мощности лазерного излучения W , уменьшая ошибку. Переключатель K предназначен для отключения регулятора.

Переходная характеристика представляет собой переходный процесс на выходе объекта, возникающий при подаче на его вход единичного скачкообразного воздействия [13]. Для экспериментального получения переходной характеристики регулятор отключается от объекта управления (переключатель K в положении 2), и на вход объекта подается единичный скачок 1 В.

Эксперименты проводились на технологическом лазере "Лантан-3" [6]. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

Система управления задает мощность излучения лазера сигналом управления частотой ионизации F_{cs} , который поступает на генератор импульсов ионизации (ГИИ). Частота импульсов ионизации соответствует заданной мощности излучения лазера. Лазерное излучение подается на термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС [12], которое измеряет его мощность. Зеркало-приемник обладает линейной характеристикой в диапазоне мощности от 0 до 3 кВт [14]. После предварительного усиления на усилителе $У$ дифференциальный сигнал с зеркала-приемника W_{meas} регистрируется цифровым запоминающим осциллографом TDS 2014 фирмы Tektronix [15].

Предварительная обработка результатов

Прежде всего, необходимо отметить запаздывание изменения мощности лазерного излу-

чения относительно сигнала управления, что показано на рис. 4.

Запаздывание составляет 1487 мкс и объясняется тем, что для первоначальной накачки газового объема до начала генерации излучения необходимо несколько импульсов ионизации. На рисунке ясно видны помехи от этих импульсов ионизации на управляющем сигнале. Таким образом, для начала генерации необходимы четыре импульса ионизации.

Переходная характеристика объекта управления показана на рис. 5.

Записано 2500 точек с частотой дискретизации 25 000 Гц. На переходной характеристике видны затухающие колебания. Первоначальное увеличение мощности лазерного излучения сменяется небольшим спадом, а затем мощность излучения снова начинает расти. Начальный участок переходной характеристики и затухающие колебания объясняются схемой подключения источника основного разряда к электродам НТР (рис. 6).

Напряжение питания источника основного разряда U_{op} подается на катод НТР К и анод

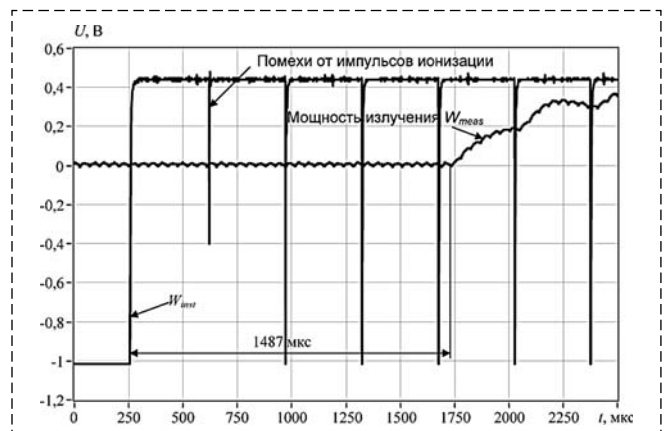


Рис. 4. Запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления

Fig. 4. Delay in changing the laser power signal relative to the control signal

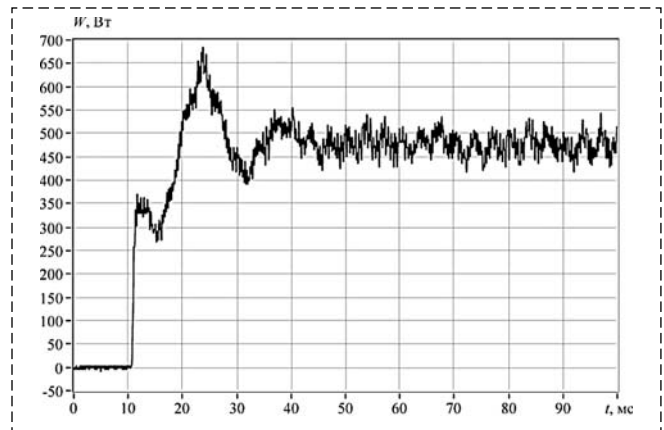


Рис. 5. Переходная характеристика объекта управления

Fig. 5. Transient response of the control object

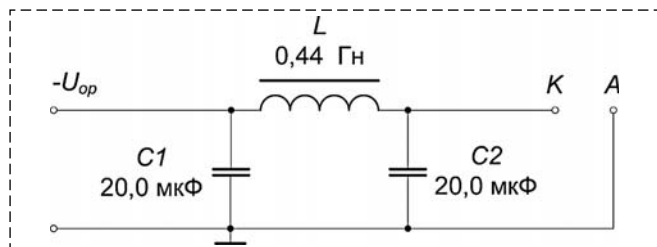


Рис. 6. Схема подключения источника основного разряда к электродам лазера

Fig. 6. Connection of the main discharge source to the laser electrodes

НТР А через две параллельные емкости $C1$ и $C2$ и дроссель L , который выполняет защитную функцию. Он замедляет рост тока при контракции (коротком замыкании) разряда, позволяя автоматическим выключателям отключить электропитание лазеров с НТР в этой аварийной ситуации.

Фильтрация переходной характеристики объекта управления

В любом случае переходный процесс имеет характер затухающих колебаний, и для его моделирования можно применить переходную характеристику колебательного звена. Однако исходный сигнал сильно зашумлен помехами, что не позволяет точно определить коэффициенты переходной характеристики. Для очистки сигнала от помех проведем преобразование Фурье исходного сигнала [16]

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt,$$

вырежем гармоники, вносящие помехи, и проведем обратное преобразование Фурье

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Для дискретных по времени сигналов вместо интегрального применяют дискретное преобразование Фурье. В среде проектирования LabVIEW 2010 реализован алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) [17]. Прямое БПФ по 2048 точкам проводилось с помощью функций FFT, а обратное БПФ — с помощью функции Inverse FFT [18].

Для спектрального анализа взята наиболее периодическая часть переходной характеристики (15,2 мс от начала регистрации) и убрана ее постоянная составляющая. При частоте дискретизации 25 000 Гц и БПФ по 2048 точкам разрешение по частоте составляет $25000/2048 = 12,21$ Гц.

Наиболее интересная часть спектра, находящаяся в диапазонах 0...4000 Гц и 0...500 Гц, показана на рис. 7, 8.

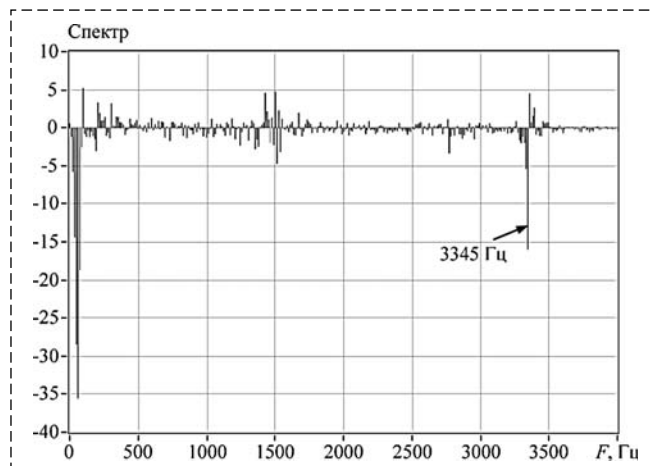


Рис. 7. Спектр переходной характеристики объекта управления в диапазоне 0...4000 Гц

Fig. 7. Spectrum of the control object transient response in the range of 0...4000 Hz

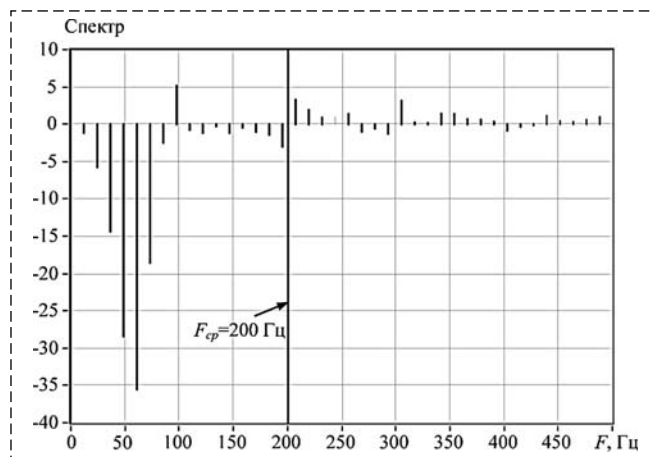


Рис. 8. Спектр переходной характеристики объекта управления в диапазоне 0...500 Гц

Fig. 8. Spectrum of the control object transient response in the range of 0...500 Hz

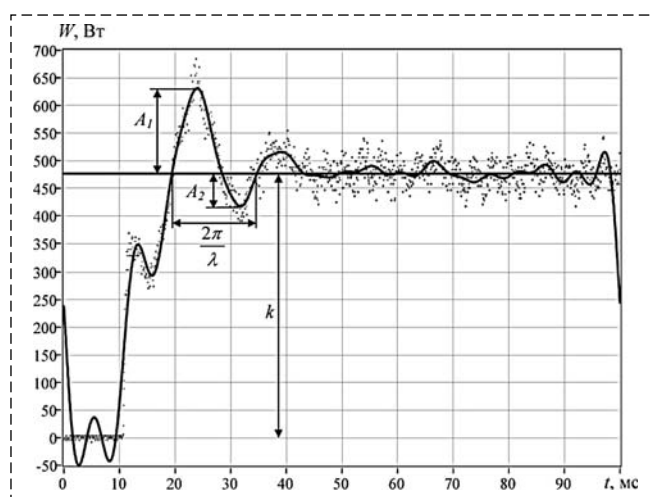


Рис. 9. Переходная характеристика объекта управления с ФНЧ с частотой среза 200 Гц после обратного БПФ

Fig. 9. Control object response with 200 Hz of the low-pass filter after inverse Fast Fourier Transform

На рис. 7 ясно видна спектральная линия помехи от импульсов ионизации на частоте 3345 Гц.

Спектр в диапазоне 0...500 Гц более детально показан на рис. 8.

Для фильтрации исходной переходной характеристики применим фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой среза, равной $F_{cp} = 200$ Гц, удаляя частоты, вносящие помехи, и проведем обратное БПФ.

Результат обратного БПФ для переходной характеристики с ФНЧ с $F_{cp} = 200$ Гц показан на рис. 9. Исходная переходная характеристика показана точками.

Моделирование переходной характеристики и определение передаточной функции объекта управления

Для того чтобы построить моделирующую переходную характеристику колебательного звена, необходимо определить четыре параметра: первый и второй максимумы функции (A_1 и A_2 соответственно), период функции $\frac{2\pi}{\lambda}$ и коэффициент передачи объекта k .

По преобразованной переходной характеристике можно вычислить коэффициенты моделирующей переходной характеристики колебательного звена для измеренной мощности излучения W_{meas} [13]:

$$h(t) = k \cdot k_s \left[1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t \right) \right] \cdot 1(t).$$

Для переходной характеристики объекта

$$A_1 = 0,324 \text{ В}, \quad A_2 = 0,124 \text{ В}, \\ \frac{2\pi}{\lambda} = 0,01536, \quad k = 476,62 \text{ Вт/В}.$$

Произведение

$$k \cdot k_s = 1, \quad (1)$$

так как коэффициент передачи объекта k и коэффициент передачи датчика мощности k_s являются обратными величинами $k = \frac{1}{k_s}$ (см. рис. 2). Тогда

$$\lambda = \frac{2\pi}{0,01536} = 409,06 \text{ с}^{-1}, \\ \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2} = 125,37,$$

и переходная характеристика моделирующего колебательного звена принимает окончательный вид

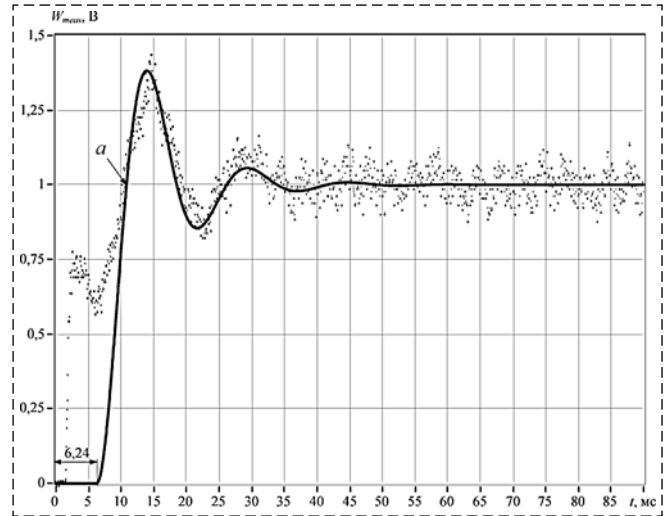


Рис. 10. Переходная характеристика объекта управления и моделирующая ее переходная характеристика колебательного звена

Fig. 10. Transient response of the control object and the transient response of the modeling oscillatory link

$$h(t) = 1 \cdot [1 - e^{-125,37t} (\cos 409,06t + 0,3065 \cdot \sin 409,06t)] \cdot 1(t). \quad (2)$$

Переходная характеристика объекта управления и моделирующая ее переходная характеристика колебательного звена показаны на рис. 10.

Для наилучшего совпадения с исходными данными моделирующая переходная характеристика задержана относительно переходной характеристики объекта. Лучший результат удалось получить при задержке на 6,24 мс. При этом на участке от первого пересечения моделирующей кривой уровня установившегося значения измеренной мощности (1 В, точка a) до конца переходной характеристики квадрат коэффициент корреляции r , который отражает степень линейной зависимости между двумя множествами, составил $r^2 = 0,618$.

Зная коэффициенты моделирующей переходной характеристики (2), можно вычислить параметры передаточной функции объекта управления для измеренной мощности лазерного излучения [13]. Передаточная функция колебательного звена, моделирующая поведение объекта управления, имеет вид

$$W(p) = \frac{k \cdot k_s}{1 + 2\xi T p + T^2 p^2},$$

где $k \cdot k_s = 1$ (1), $\gamma = \xi q$, $\lambda = q\sqrt{1 - \xi^2}$,

тогда $\lambda = \frac{\gamma\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}$ и $\xi = \frac{\gamma}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}}$.

Поскольку $q = \frac{1}{T}$, то получаем $T = \frac{\xi}{\gamma}$.

При $\lambda = 409,06 \text{ с}^{-1}$ и $\gamma = 125,37$ получаем

$$\xi = 0,293, T = 0,00234 \text{ с}, q = 427,84 \text{ с}^{-1}.$$

Передаточная функция модели объекта управления приобретает окончательный вид

$$W(p) = \frac{1}{1 + 1,37 \cdot 10^{-3} p + 5,46 \cdot 10^{-6} p^2}.$$

Полученное колебательное динамическое звено, моделирующее поведение объекта управления, обладает большой колебательно-стью переходного процесса и небольшим запасом устойчивости, что необходимо учитывать для обеспечения необходимой точности и требуемого качества переходного процесса при проектировании регулятора системы управления мощностью лазерного излучения.

Выводы

Исследована автоматическая система управления мощностью излучения лазеров с НТР, на примере лазеров серии "Лантан". Экспериментально получена переходная характеристика лазера с НТР и установлено запаздывание изменения мощности лазерного излучения относительно сигнала управления. Вид переходной характеристики определяется свойствами объекта управления и особенностями подключения источников питания к НТР. Для моделирования объекта управления предложена моделирующая переходная характеристика колебательного звена и, после фильтрации помех, определены ее параметры. На основе параметров моделирующей переходной характеристики вычислена передаточная функция объекта управления, что позволит перейти к проектированию системы управления, обеспечивающей наилучшее качество переходного процесса.

Список литературы

1. Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Физические основы технологических лазеров. М.: Высшая школа, 1987. 190 с.

2. Басов Н. Г., Бабаев И. К., Данилычев В. А., Михайлов М. Д., Орлов В. К., Савельев В. В., Сон В. Г., Чебуркин Н. В. Электроионизационный CO_2 -лазер замкнутого цикла непрерывного действия // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 4. С. 772–781.

3. Беляев А. П., Дмитерко Р. А., Епишов В. А., Наумов В. Г., Пашков В. М., Шулаков В. Н. Мощный быстропроточный CO_2 -лазер непрерывного действия с накачкой комбинированным разрядом // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 6. С. 325–328.

4. Генералов Н. А., Зимаков В. П., Косынкин В. Д., Райзер Ю. П., Соловьев Н. Г. Быстропроточный технологический CO_2 -лазер комбинированного действия // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549–1557.

5. Hill A. E. Continuous uniform excitation of medium pressure CO_2 laser plasmas by means of controlled avalanche ionization // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 22(12). P. 670–673.

6. Generalov N. A., Gorbulev M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. High-Power Industrial CO_2 Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge // In W. J. Witteman and V. N. Ochkin (eds.), Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects. Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 323–341.

7. Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser // In Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE. 2007. Vol. 6611. Paper 66110K. 8 p.

8. Оришич А. М., Фомин В. М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов: Монография. Новосибирск: Изд. Новосиб. гос. ун-та, 2011. 192 с.

9. Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособ. для вузов. М.: Высшая школа, 2004. 365 с.

10. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Особенности управления мощностью излучения технологического CO_2 -лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом с учетом деградации рабочей смеси газов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 50–54.

11. Генератор импульсов ионизации: пат. 2750851 Рос. Федерация / Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Якимов М. Ю.; заявл. 30.09.20; опубл. 05.07.21. Бюл. № 19.

12. Glebov V. N., Manankov V. M., Maluytin A. M., Golovatyuk N. N., Zastavny Y. V. Thermoelectric mirror-detector for laser radiation // Proc. SPIE 2257. 1994. P. 225–227.

13. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

14. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю. Управление мощностью излучения технологического CO_2 -лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом путем изменения частоты импульсов ионизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 4. С. 224–231.

15. Цифровые запоминающие осциллографы серии TDS1000 и TDS2000. Руководство пользователя. Tektronix, Inc. 190 с.

16. Математические основы теории автоматического регулирования. Т. 2 / Под ред. Чемоданова Б. К. М.: Высшая школа, 1977. 455 с.

17. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 800 с.

18. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.

Dynamic Characteristics Determination of the Radiation Power Control System for the Industrial CO_2 Laser Excited by a Nonselv-Sustained Glow Discharge

A. N. Shemyakin¹, shemyakin@lantanlaser.ru, M. Yu. Rachkov², michyur@gmail.com,
N. G. Solovyov¹, solovyov@lantanlaser.ru, M. Yu. Yakimov¹, yakimov@lantanlaser.ru,
M. A. Kotov¹, kotov@ipmnet.ru,

¹ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation

² Moscow State Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

Abstract

In the article, an automatic system for radiation power control of lasers excited by a nonself-sustained glow discharge is studied using industrial lasers of the Lantan series as an example. They are designed for cutting, welding and surface modification of various materials as part of laser machines. The power of laser radiation is one of the most important parameters of a laser that determines its technological capabilities. The radiation power is controlled by changing the ionization pulses frequency of high voltage pulses with duration of 100 ns, given with a frequency of 1-5 kHz. The step response of the laser is experimentally obtained. Laser radiation is fed to a thermoelectric mirror-detector with thermo-EMF anisotropy, which measures its power. After preliminary amplification, the differential signal from the mirror-detector is recorded by a digital oscilloscope. A delay in the change in the laser radiation power relative to the control signal was established. The delay is 1487 μ s that is explained by the fact that several ionization pulses are required for the initial exciting of the gas volume before the start of radiation generation. The initial section of the step response and damped oscillations are explained by the presence of a protective choke in the main discharge source connection circuit. The choke slows down the rise in current during the short circuit of discharge, allowing circuit breakers to turn off the power supply. To simulate the transient process, the step response of the oscillating circuit is used. The original signal was filtered to remove noise that does not allow determining the parameters of the step response. To determine the spectrum of the step response, fast Fourier transform is carried out, frequencies introducing noise were cut out, and the inverse fast Fourier transform is performed. According to the step response obtained after filtering, the parameters of the modeling step response are determined. Based on the parameters of the step response, the laser transfer function is calculated. It makes possible to proceed to the calculation of the optimal radiation power controller, which ensures the best quality of the transient process.

Keywords: industrial laser, nonself-sustained glow discharge, frequency of the ionization pulses, laser power control system, step response, interference filtering, Fast Fourier transform, transfer function

For citation:

Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu., Kotov M. A. Dynamic Characteristics Determination of the Radiation Power Control System for the Industrial CO₂ Laser Excited by a Nonself-Sustained Glow Discharge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 199–205.

DOI: 10.17587/mau.24.199-205

References

1. Golubev V. S., Lebedev F. V. Physical foundations of industrial lasers, Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 190 p. (in Russian).
2. Basov N. G., Babaev I. K., Danilychev V. A., Mikhailov M. D., Orlov V. K., Savelyev V. V., Son V. G., Cheburkin N. V. Electroionization CO₂-laser of a closed cycle of continuous action, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1979, vol. 6, iss. 4, pp. 772–781 (in Russian).
3. Belyayev A. P., Dmiterko R. A., Epishov V. A., Naumov V. G., Shashkov V. M., Shulakov V. N. High-power fast-flow cw CO₂ laser excited by a combined discharge, *Technical Physics Letters*, 1979, vol. 5, no. 6, pp. 325–328 (in Russian).
4. Generalov N. A., Zimakov V. P., Kosynkin V. D., Raiser Yu. P., Solovyov N. G. Rapid-flow combined-action industrial CO₂ laser, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 9, no. 8, pp. 1549–1557 (in Russian).
5. Hill A. E. Continuous uniform excitation of medium pressure CO₂ laser plasmas by means of controlled avalanche ionization, *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 22(12), pp. 670–673.
6. Generalov N. A., Gorbulenko M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. High-Power Industrial CO₂ Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge, In *W. J. Witteman and V. N. Ochkin (eds.), Gas Lasers — Recent Developments and Future Prospects*, Kluwer Academic Publishers, 1996, Printed in the Netherlands, pp. 323–341.
7. Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser, In *Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE*, 2007, vol. 6611, Paper 66110K, 8 p.
8. Orishich A. M., Fomin V. M. Actual problems of the physics of laser cutting of metals, Novosibirsk, Publishing house of Novosib. state university, 2011, 192 p. (in Russian).
9. Vostrikov A. S., Frantsuzova G. A. Theory of automatic control: Proc. allowance for universities, Moscow, Vysshaya shkola, 2004, 365 p. (in Russian).
10. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solov'yov N. G. Features of radiation power control of the industrial CO₂ lasers excited by a nonself-sustained glow discharge with regard to dissociation in a working gas mixture, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 8, p. 50–54 (in Russian).
11. Ionization pulse generator: Pat. 2750851 Ros. Federation / Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu., dec. 30.09.20, publ. 05.07.21, Bull. No. 19 (in Russian).
12. Glebov V. N., Manankov V. M., Malyutin A. M., Golovatyuk N. N., Zastavny Y. V. Thermoelectric mirror-detector for laser radiation, *Proc. SPIE 2257*, 1994, pp. 225–227.
13. Besekerskiy V. A., Popov Ye. P. Theory of automatic control systems, Moscow, Nauka, 1975, 768 p. (in Russian).
14. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu. Upravlenie moshchnost'yu lazernogo izlucheniya tekhnologicheskogo kompleksa s nesamostoyatel'nyim tleyushchim razryadom putem izmemeniya chastoty impulsov ionizatsii, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 224–231.
15. Digital storage oscilloscopes of the TDS1000 and TDS2000 series, User's manual, Tektronix Inc, 190 p. (in Russian).
16. Chemodanova B. K. ed. Mathematical foundations of the theory of automatic control, vol. 2, Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 455 p. (in Russian).
17. Travis J., Kring J. LabVIEW for everyone, Moscow, DMK Press, 2008, 800 p. (in Russian).
18. Suranov A. Ya. LabVIEW 8.20: Functions Reference book, Moscow, DMK Press, 2007, 536 p. (in Russian).