

Цифровые системы управления промышленными оптико-электронными лазерными комплексами

М.С. Кузнецов¹, Н.А. Марков².

¹ *Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых*
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
E-mail: mkuznecvo@laser33.ru

Рассматриваются принципы построения цифровых систем управления промышленными оптико-электронными лазерными комплексами. Особое внимание уделено структуре замкнутых контуров управления, взаимодействию подсистем лазерного излучения и исполнительной кинематики, а также алгоритмам цифровой обработки сигналов в реальном времени. Показано, что ключевым фактором повышения качества технологического процесса является согласованное управление энергетическими и пространственными параметрами лазерного воздействия. Рассмотрены подходы к обеспечению устойчивости и адаптации системы управления в условиях неопределенности параметров объекта.

Ключевые слова: цифровое управление, лазерные комплексы, оптико-электронные системы, обратная связь, ПИД-регулятор.

Digital control systems for industrial optoelectronic laser complexes

M.S. Kuznetsov¹, N.A. Markov.

¹ *Vladimir State University.*

This paper considers the principles of designing digital control systems for industrial optoelectronic laser systems. Particular attention is paid to the structure of closed-loop control systems, the interaction between laser radiation subsystems and actuator kinematics, as well as real-time digital signal processing algorithms. It is shown that the key factor in improving the quality of the technological process is the coordinated control of the energy and spatial parameters of the laser processing process. Approaches to ensuring stability and adaptation of the control system under conditions of parameter uncertainty are discussed.

Keywords: digital control, laser systems, optoelectronic systems, feedback, PID controller.

Введение

Промышленные лазерные комплексы представляют собой сложные системы, в которых совмещаются источники лазерного излучения, оптико-электронные элементы формирования пучка и многоосевые исполнительные системы [1-4].

Ключевая проблема при их эксплуатации заключается в обеспечении устойчивого и воспроизводимого технологического режима при наличии множества возмущений: тепловых, механических и энергетических.

В этих условиях цифровые системы управления становятся основным инструментом обеспечения качества процесса, так как позволяют реализовать замкнутые контуры регулирования, адаптацию параметров и обработку измерительной информации в реальном времени. Основные принципы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами рассмотрены в [5, 6].

В качестве базового алгоритма регулирования в промышленных системах управления широко применяется пропорционально-интегрально-дифференциальный

(ПИД) регулятор, обеспечивающий стабилизацию параметров технологического процесса за счет формирования управляющего воздействия на основе текущего и накопленного отклонения [7].

Структура системы управления

Цифровая система управления лазерным комплексом может быть представлена как совокупность взаимосвязанных устройств:

- управления мощностью лазерного излучения;
- пространственного позиционирования оптической головы;
- управления технологическими параметрами процесса лазерной обработки;
- диагностики и мониторинга;
- питания.

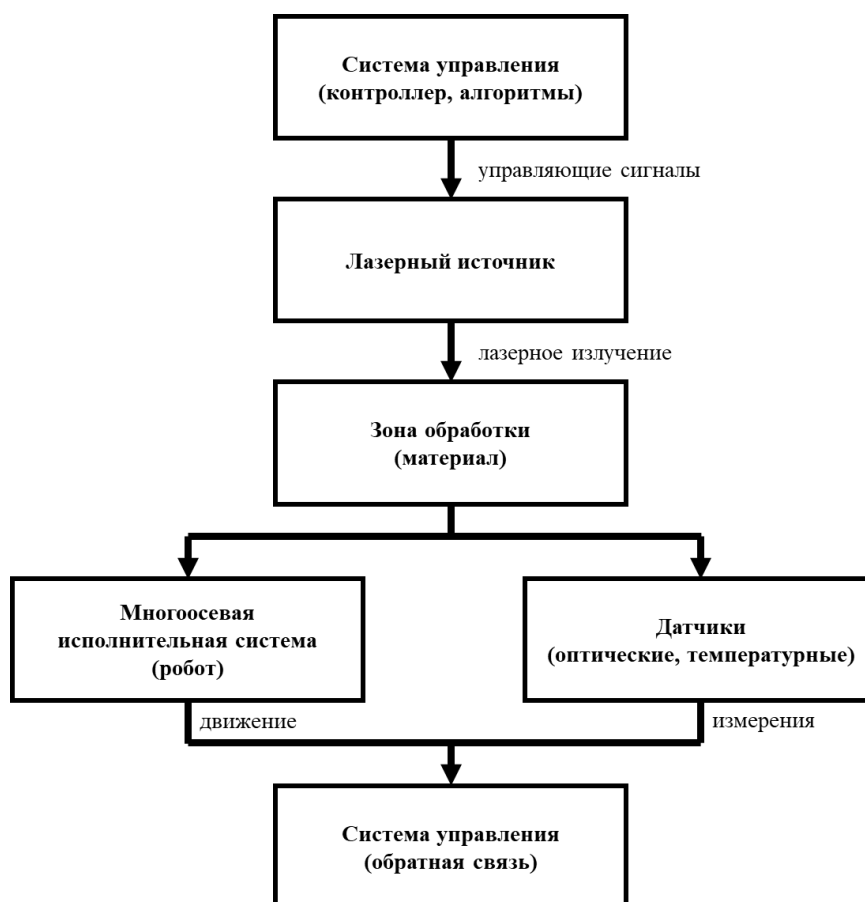


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Перечисленные подсистемы функционируют в рамках единой цифровой архитектуры управления, обеспечивающей согласование параметров лазерного излучения и движения исполнительной системы. В процессе работы происходит непрерывный обмен данными между измерительными и исполнительными элементами, что позволяет формировать управляющие воздействия с учетом текущего состояния технологического процесса.

Особенностью лазерных комплексов является необходимость координации энергетических и пространственных параметров, что требует реализации многоканальных контуров управления с различной динамикой.

Таблица 1. Основные параметры управления лазерного процесса

Параметр	Обозначение	Влияние на процесс
Мощность лазера	P	Глубина проплавления
Скорость перемещения	V	Ширина и равномерность
Положение фокуса	F	Концентрация энергии
Температура	T	Металлургические свойства
Отраженный сигнал	R	Стабильность процесса

Представленные параметры характеризуют основные управляющие воздействия и контролируемые величины процесса лазерной обработки. При этом их влияние носит взаимосвязанный характер: изменение одного параметра приводит к необходимости коррекции остальных. Например, увеличение скорости перемещения оптической головы требует соответствующего изменения мощности лазерного излучения для сохранения заданной плотности энергии, однако качественный результат лазерной обработки необязательно коррелирует с изменением сразу всех параметров одновременно.

Принципиально важно, что данные устройства не являются независимыми. Изменение скорости перемещения оптической головы напрямую влияет на требуемую плотность энергии, а значит – на режим работы источника лазерного излучения.

В обобщенном виде система описывается как многосвязный объект управления, изменяющийся во времени [8, 9]:

$$y(t) = f(u(t), d(t), p(t)), \quad (1)$$

где $u(t)$ – управляющие воздействия;

$d(t)$ – внешние возмущения;

$p(t)$ – параметры объекта.

Алгоритмы цифрового управления

Цифровая реализация управления предполагает дискретизацию сигналов и вычисление управляющих воздействий с заданным периодом. Методы дискретного управления и цифровой обработки сигналов подробно рассмотрены в [9, 10].

В рамках цифровой реализации управления ПИД-регулятор реализуется в дискретной форме, что позволяет учитывать особенности цифровой обработки сигналов и задержки в системе. Выбор коэффициентов регулятора определяется динамическими характеристиками объекта управления и требованиями к устойчивости и точности регулирования [7, 8].

Базовая структура алгоритма:

- измерение параметров процесса (мощность, температура, положение инструмента);
- оценка состояния системы;
- формирование управляющего воздействия.

Перечисленные этапы реализуются в рамках циклического алгоритма управления, выполняемого с заданным периодом дискретизации. На каждом шаге производится оценка текущего состояния системы и вычисление управляющего воздействия на основе отклонения измеренных параметров от заданных значений.

Качество управления определяется точностью измерений, выбором алгоритма регулирования и частотой дискретизации. Недостаточная частота приводит к запаздыванию и ухудшению динамических характеристик системы, тогда как

избыточная увеличивает вычислительную нагрузку без существенного улучшения качества регулирования.

Особенности управления лазерным технологическим процессом

Лазерная обработка характеризуется рядом свойств, усложняющих управление:

1. Зависимость между мощностью излучения и результатом обработки (глубина проплавления, качество шва) носит нелинейный характер и зависит в том числе от типа и марки материала;
2. Эффект накопления тепла приводит к запаздыванию реакции системы на управляющее воздействие;
3. Результат определяется совокупностью параметров: мощность лазерного излучения, скорость перемещения оптической головы, фокусировка, геометрия траектории.

Таким образом, управление лазерным технологическим процессом представляет собой задачу многопараметрического регулирования, в которой необходимо учитывать нелинейность объекта, запаздывание и взаимное влияние параметров. Это существенно усложняет создание системы управления и требует применения адаптивных и комбинированных методов регулирования.

Роль оптико-электронной обратной связи

Использование оптико-электронной обратной связи позволяет перейти от разомкнутого управления к замкнутому, что существенно повышает устойчивость и повторяемость технологического процесса. При этом точность измерительных систем непосредственно влияет на качество регулирования, так как ошибки измерения приводят к формированию некорректных управляющих воздействий.

Ключевым элементом системы является подсистема измерения, включающая:

- датчики отраженного сигнала;
- системы контроля зоны обработки (машинное зрение).

Эти данные позволяют реализовать замкнутый контур: поддержание заданной мощности, контроль стабильности процесса, выявление отклонений (например, изменение коэффициента отражения поверхности).

Обеспечение устойчивости системы

Устойчивость цифровой системы управления определяется совокупностью динамических характеристик лазерного источника, исполнительной системы и алгоритмов обработки сигналов. Существенное влияние оказывают задержки в каналах измерения и управления, а также дискретный характер обработки сигналов.

Для обеспечения устойчивости применяются методы компенсации запаздывания, цифровой фильтрации и согласования параметров регуляторов с динамикой объекта. При этом необходимо учитывать взаимное влияние контуров управления, что требует использования многоканальных алгоритмов регулирования [8].

Дополнительно устойчивость системы определяется корректным выбором структуры регулятора, в качестве которого в большинстве промышленных систем применяется ПИД-регулятор, обеспечивающий базовую стабилизацию параметров процесса, а также параметров его настройки. При проектировании системы управления необходимо учитывать как динамику объекта, так и характеристики измерительных каналов, включая шумы и задержки.

Выводы

Установлено, что цифровая система управления лазерным комплексом представляет собой многосвязный объект, требующий согласованного регулирования энергетических и кинематических параметров.

Показано, что применение замкнутых контуров управления с использованием оптико-электронной обратной связи позволяет повысить устойчивость и воспроизводимость технологического процесса.

Определено, что основными факторами, влияющими на качество управления, являются задержки в каналах обработки сигналов, нелинейность объекта и взаимное влияние параметров.

Реализация цифровых алгоритмов управления обеспечивает возможность адаптации системы к изменяющимся условиям обработки.

Литература

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Григорьянц А.Г. Лазерная сварка металлов. – М.: Высшая школа, 1988.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
4. Comparative Analysis of Optical Schematics for a Laser Emitter Module Designed for High-Power-Density Beam Focusing at Long Distances / M. S. Kuznetsov, A. V. Zavitkov, A. B. Lyukhter [et al.] // Photonics Russia. – 2026. – Vol. 20, No. 2. – P. 106-119. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2026.20.2.106.118.
5. Васильев В.Н. Системы автоматического управления технологическими процессами. – М.: Машиностроение, 2009.
6. Антипов В.И. Основы автоматизации производственных процессов. – М.: Академия, 2012.
7. Астрем К.Ю., Хегглунд Т. ПИД-регуляторы: теория, проектирование и настройка. – М.: БИНОМ, 2008.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003.
9. Кудинов В.А. Теория автоматического управления. – М.: Академия, 2013.
10. Дьяконов В.П. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002.