

УДК 621.375.826:621

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕЗАВИСИМОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКА МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© В. П. Котляров, д.т.н., профессор, Хаджи Моллабаши  
Хамидреза, М. В. Галина, НТУУ «КПИ», Киев, Украина

**Зважаючи на недостатню керованість параметрів пучка лазерного випромінювання у серійних лазерних установках, є сенс дослідити якість штатного впливу на режим їх роботи та запропонувати засоби параметричного, тобто незалежного керування режимом опромінення в технологічних операціях лазерної обробки форм для друку.**

**Because of laser radiation bunch parameters undercontrolling in the serial laser settings, there is sense to probe regular influence quality on their work regime and offer facilities of independent irradiation management in the technological operations of form units laser treatment.**

#### Постановка задачи исследований

Во многих практических применениях лазеров (в технологии, медицине, локации и пр.) необходимый положительный эффект достигается за счет придания пучку излучения необходимых энергетических, временных и пространственных характеристик, обеспечивающих требуемый уровень интенсивности  $I_p$  в зоне облучения:

$$I_p = \frac{P}{S} = \frac{4E}{\pi d_0^2 t} \quad (1) \text{ — для непо-}$$

движного источника;

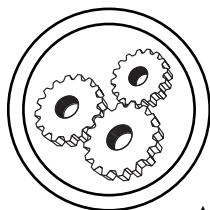
$$I_p = \frac{P}{S} = \frac{E}{St} = \frac{E}{(\pi d_0 / 4 + Vt) d_0 t} \quad (2) \text{ — при от-}$$

носительном перемещении источника излучения и облучаемого объекта (заготовки) со скоро-

стью  $V$ , где:  $E$  и  $P$  — энергия и мощность пучка излучения соответственно,  $S$  — площадь зоны облучения диаметром  $d_0$ ,  $d_0 \approx F\theta + \Delta FD/F$  ( $F$  — фокусное расстояние фокусирующей линзы,  $\theta$  — угол расходимости пучка излучения,  $D$  — его диаметр на уровне главной плоскости линзы,  $\Delta F$  — положение поверхности заготовки относительно перетяжки каустики пучка после линзы), а  $t$  — длительность облучения (при импульсном режиме подачи энергии соответствует длительности импульса:  $t = \tau$ ).

Таким образом, видно, что для количественного изменения уровня интенсивности необходимо управление или контроль над уровнями следующих характеристик пучка излучения и условий облучения:

- энергетических  $E$ ,  $P$ ;
- временных  $t$  ( $\tau$ );
- пространственных  $\theta$  и  $D$ ;



## МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

— условий облучения  $V$ ,  $F$  и  $\Delta F$ .

Если параметры последней группы характеристик взаимно независимы и, вследствие этого, могут принимать любые значения, то параметры пучка излучения при их изменении штатными методами принимают зависимые значения, то есть они взаимно коррелированы. Вследствие этого затрудняется или становится невозможной точная настройка режима обработки, а также управление состоянием объекта — процесса лазерной обработки — в экспериментальных исследованиях по разнообразным методикам. Для устранения этих трудностей необходимо:

— установить действительное влияние штатного регулятора режима работы лазера на параметры пучка излучения;

— разработать методику параметрического управления пучком излучения, учитывающую характер действительного влияния используемого регулятора;

— применить известные или разработать новые средства для дополнительного и управляемого воздействия на режим генерации лазера.

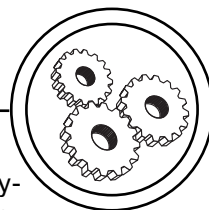
Анализ конструкций лазерных технологических установок известных в прошлом производителей [1, 2] и современных [3, 4] показал, что, несмотря на существенные качественные изменения, в первую очередь, излучателя, принцип управления режимом его работы остался неизменным — воздействие на процесс возбуждения активной среды.

Для лазеров с импульсной накачкой управление сводится к изменению уровня и частоты подачи энергии накачки к источникам возбуждения активной среды (к лампе накачки или линейкам диодов — для твердотельных лазеров) либо за счет изменения напряжения или ёмкости накопителя. Хотя такое воздействие на режим генерации приводит к одновременному изменению временных и пространственных характеристик пучка излучения, возможно дополнительное воздействие на длительность импульса перестройкой разрядного контура источника тока LC.

Режим работы лазеров с непрерывной накачкой изменяется воздействием на разрядный ток через диоды или лампу накачки (твердотельные лазеры) или в газоразрядной камере (газовые лазеры). Для непрерывного режима генерации это приводит к одновременному изменению пространственных характеристик пучка излучения (диаметра пучка, его модового состава и угла расходимости). При импульсном выводе энергии из резонатора за счет использования лазерных затворов (внутри резонаторных модуляторов), что позволяет среднюю мощность излучения перераспределять между пиками, изменяя частоту и скважность их генерации, изменение мощности накачки также влияет на пространственные характеристики пучка излучения.

Такое вынужденное зависимое воздействие на ряд параметров пучка излучения приводит к не предсказуемому изме-

## МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



нению интенсивности (1) и (2) в зоне облучения и, следовательно, к такому же воздействию на процесс обработки и его результаты.

Таким образом, приведенные выше мероприятия по устранению трудностей настройки технологической установки на рабочий режим, необходимы также для повышения управляемости и определенности уровней настраиваемых параметров пучка излучения, в том числе, комплексной характеристики — интенсивности излучения. Поэтому их реализация может составлять цель настоящих исследований.

### Эксплуатационные характеристики лазеров

Таковыми характеристиками обычно являются зависимости энергетических, пространственных и временных характеристик от уровня управляемого (регулируемого) фактора. Такие

зависимости могут быть получены как в результате классических (однофакторных), так и многофакторных экспериментов. В связи с тем, что целью исследований является получение ряда зависимостей при изменении одного фактора, управляющего процессом генерации, целесообразно использовать однофакторную стратегию, что позволит физически интерпретировать полученные результаты. Пример таких зависимостей для ряда технологических лазеров с импульсной накачкой активного элемента показан на рис. 1.

Можно отметить, что при любом из методов изменения энергии накачки (напряжением на накопительном конденсаторе формирующей линии накачки  $U_H$  или его величиной его ёмкости  $C$ ) очевидна связь между длительностью импульса и его энергией, причем в одном случае при росте энергии в 4 раза

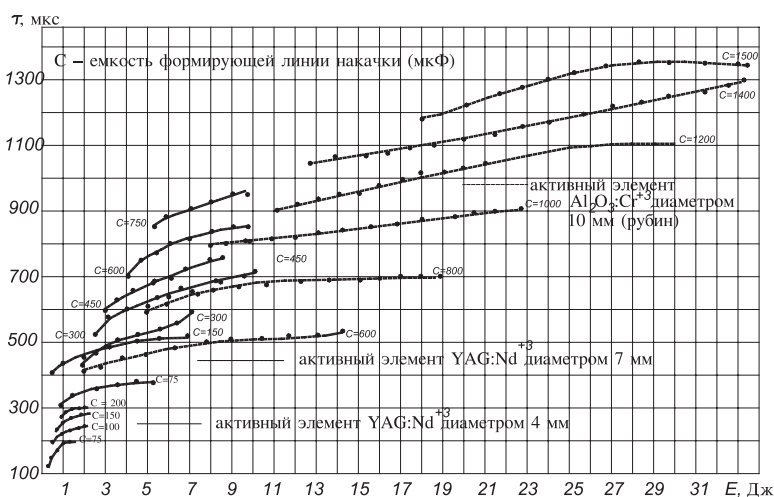
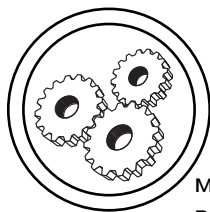


Рис. 1. Эксплуатационные характеристики лазеров



## МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

мощность излучения увеличивается лишь в 2,33 (кривая 1), а в другом (кривая 2) — увеличение составляет 1,08 (при росте энергии в 1,3). Если учесть, что при этом также изменяются пространственные характеристики пучка излучения (его диаметр  $D$  и угол расходимости  $\theta$  — рис. 2), то в соответствии с зависимостями (1) и (2) интенсивность в зоне облучения будет снижаться, а не увеличиваться, как можно было предположить. Зависимости, приведенные на рис. 1 лишь свидетельствуют о сложном влиянии используемого метода управления на режим генерации лазера, но не определяют пути параметрического управления характеристиками пучка излучения.

Рассмотрим подробнее воздействие энергии накачки при любом способе ее изменения отдельно на каждый параметр пучка излучения. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости импульсной энергии

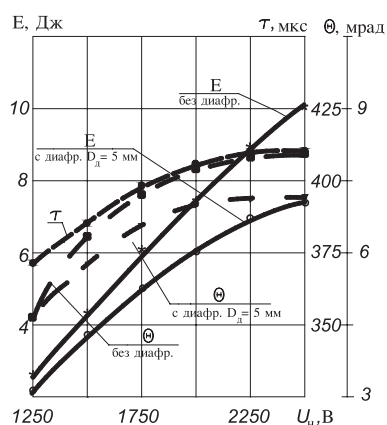


Рис. 2. Эксплуатационные характеристики излучателя на гранате при управлении напряжением накачки лампы

$E$ , длительности импульса  $\tau$  и угла расходимости пучка излучения  $\theta$  для лазера на гранате с ламповой импульсной накачкой, а на рис. 3 — мощности  $P$ , диаметра  $D$  и угла расходимости  $\theta$  пучка излучения для лазера на гранате с ламповой непрерывной накачкой (ЛТН-102). Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

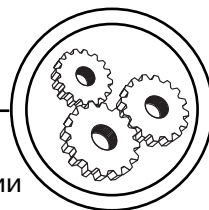
- монотонный рост энергетических характеристик излучения ( $E$  и  $P$ ) объясняется как увеличением объема активной среды с инверсной населенностью примесных частиц ( $Nd^{+3}$ ), так и повышением степени инверсии в прокаченном объеме;

- диафрагмирование поперечного сечения активной среды несколько меняет вид зависимости, так как с некоторого уровня накачки действие первой причины роста энергии прекращается и последняя зависит лишь от количества возбужденных частиц в объеме активной среды, сечение которой ограничено диафрагмой  $D_d$ ;

- длительность импульса излучения  $\tau$  меняется вследствие изменения темпа нарастания уровня инверсии в активной среде и из-за этого более раннего превышения и позднего снижения её ниже порога генерации, что сильнее сказывается при низких уровнях энергии накачки и приводит к достижению длительностью некоторого предельного значения при максимальном ее уровне;

- подобную зависимость имеет угол расходимости пучка излучения  $\theta$ , однако, причиной этого является увеличение поперечного размера активной

## МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



среды, накаченной выше порога генерации, что приводит к повышению индекса поперечной моды ( $m$  или  $n$ ), на которой возможна генерация, и при максимальном уровне накачки достигается наибольшая расходимость пучка;

— диафрагмирование поперечного сечения активной среды приводит к уменьшению наибольшей расходимости (снижается индекс  $m$  или  $n$ ), однако, характер зависимости сохраняется;

— поперечный размер пучка излучения  $D$  также зависит от его модового состава, поэтому достигает максимального значения при достижении порогового уровня накачки во всем объеме активной среды, дальнейший ее рост практически не изменяет размер пучка.

Приведенные зависимости не только демонстрируют неоднозначность влияния энергии накачки на параметры пучка излучения, но также позволяют выявить некоторые особенности зависимостей, которые мож-

но использовать при решении задачи параметрического управления пучком излучения.

### *Разработка методики независимого (параметрического) управления пучком лазерного излучения*

Для управления энергией (мощностью) пучка излучения (кроме изменения уровня накачки) наиболее часто применяют его диафрагмирование и аттенюацию (ослабление). Если по первому методу на длительность импульса это не оказывает влияния, то размер пучка и угол его расходимости изменяются существенно (рис. 2), что, естественно, влияет на уровень интенсивности в зоне облучения и может привести к неожиданному влиянию на процесс обработки. Поэтому любые известные конструкции диафрагм, например [6], не могут быть рекомендованы для независимого изменения уровня энергии (мощности) излучения.

Для ослабления пучка обычно используют поглощающие

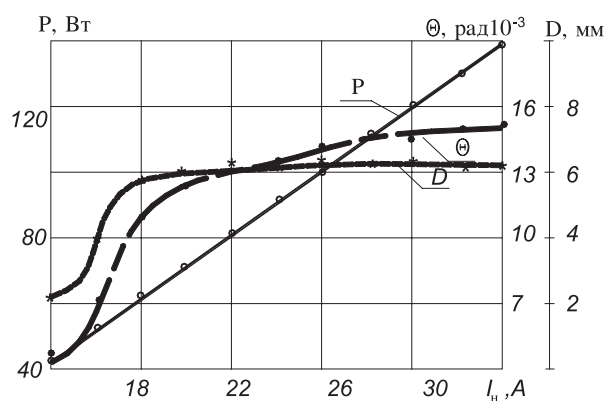
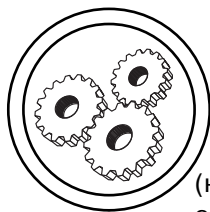


Рис. 3. Эксплуатационные характеристики излучателя ЛТН-102 при управлении током накачки



## МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

(нейтральные) или зеркальные светофильтры (интерференционные зеркала), обеспечивающие избирательное действие на пучок излучения: пространственные (угол расходимости и поперечный размер) и временные его параметры остаются практически неизменными. Некоторое неудобство составляет дискретный характер изменения уровня энергетического параметра с шагом, который определяется интервалом изменения коэффициента поглощения (отражения) у используемого набора светофильтров. Для устранения этого недостатка предлагается оригинальная методика комплексного воздействия на пучок излучения, основанная на ослаблении пучка светофильтрами и использующая эффект насыщения таких его параметров как длительность импульса (рис. 2), диаметр пучка (рис. 3) и угол расходимости (рис. 2 и 3) при достаточно высоком уровне возбуждения активной среды. Она предназначена для настройки определенного набора параметров пучка излучения, которые вместе с условиями облучения составляют режим обработки в технологической операции или для размерного варьирования факторов (параметров пучка излучения) на нескольких уровнях при экспериментальных методах моделирования процесса обработки или его оптимизации [7]. Разработанная методика состоит из следующих процедур.

— проектирование (модернизация) резонатора технологического лазера (сочетание кривизны зеркал и их взаимного

расположения) для формирования пучка излучения с заданными пространственными характеристиками при использовании в нем выбранной активной среды (с учетом ее размеров);

— модернизация формирующей линии накачки (ФЛН) (емкости  $C$  и индуктивности  $L$  её разрядного контура) для генерации импульса излучения заданной длительности;

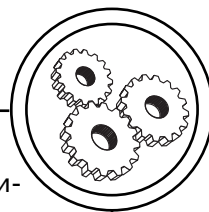
— экспериментальное исследование разработанного (модернизированного) излучателя с целью построения его эксплуатационных характеристик (импульсной энергии, длительности и угла расходимости пучка излучения), подобных зависимостям рис. 2;

— выбор уровней варьирования управляемого параметра (энергии  $E$ ), определение уровня энергии накачки (напряжения  $U_n$  на обкладках ёмкости  $C$ ), выше которого изменения длительности, размера и угла расходимости пучка излучения незначительны;

— подбор светофильтров для «грубого» изменения энергии излучения и уровня энергии накачки для «тонкой» её регулировки до требуемого уровня.

На примере настройки режима работы излучателя, эксплуатационные характеристики которого приведены на рис. 2, покажем реализацию предложенного принципа выбора режима генерации для изменения импульсной энергии на трех уровнях 4,0; 6,5 и 9,0 Дж в эксперименте по многофакторной методике (рис. 4). Исходя из допустимых вариаций длительности импульса ( $\pm 2\% \tau$ ) и угла расхо-

## МАШИНЫ I АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



димости ( $\pm 5\% \theta$ ), за граничное значение напряжения накачки, после которого изменчивость этих параметров излучения пренебрежимо мала, можно принять уровень  $U_n^* = 1850$  В. Тогда III уровень энергии (9,0 Дж) можно получить при  $U_{н3} = 2260$  В, II уровень (6,5 Дж) — при  $U_{н2} = 2400$  В с использованием светофильтра НС-1 с коэффициентом ослабления  $k_{осл} = 1,46$  и I уровень (4,0 Дж) — при  $U_{н1} = 2300$  В при светофильтре НС-2 с  $k_{осл} = 2,12$ . Светофильтры были выбраны из наличного их набора.

Для дискретного, но независимого управления длительностью импульсов излучения можно использовать в источниках питания лазера ФЛН лестничного типа, представляющую собой последовательную систему из нескольких ячеек (разрядных контуров с элементами  $C_{я}$  и  $L_{я}$ ). Изменением количества включенных ячеек  $n$  управляют длительностью импульса в соответствии с зависимостью  $\tau = n\tau_{я}$ , где  $\tau_{я}$  — длительность импульса излучения при использовании одной ячейки. Импульсная мощность при таком управлении поддерживается на одном уровне. При непрерывной накачке активной среды и формировании импульсного излучения лазерными затворами его временной характер устанавливается параметрами работы затвора. Внешняя модуляция пучка излучения применяется редко в связи с низкой ее эффективностью, что связано с потерей энергии в отсекаемой части пучка.

Угол расходимости пучка излучения определяется конфигу-

рацией резонатора лазера и типом активной среды:

$$\theta_{00} = \frac{2\lambda}{\pi W_0} \quad \text{— для одномодового пучка TEM}_{00},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера,  $W_0$  — радиус перетяжки каустики резонатора.

$$\theta_{mn} = 2,44 \frac{\lambda}{W_0} \quad \text{— для многомодового пучка TEM}_{mn},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера,  $W_0$  — радиус перетяжки каустики резонатора.

Очевидно, что оперативное управление углом расходимости пучка излучения воздействием на параметры резонатора невозможно при оснащении последнего специальными элементами, такими как зеркала адаптивной конструкции, механизм дистанционного изменения длины резонатора и его поперечного сечения. В связи с тем, что подобные элементы используются редко, для управления углом расходимости применяют внешнюю оптическую систему в виде

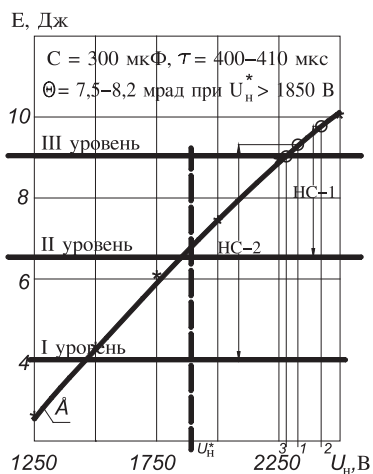
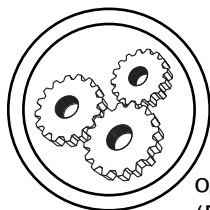


Рис. 4. Пример управления энергией излучения для многофакторного эксперимента



## МАШИНЫ I АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

одиночной линзы или телескопа (Галилея, Кеплера, Кассегрена) [8]. Афокальный телескоп Галилея (рис. 5) предпочтителен в связи с отсутствием явной фокальной области с повышенным уровнем интенсивности излучения. Основной характеристикой телескопа является его линейное увеличение  $\Gamma = -F_1/F_2$ . Если диаметр пучка излучения на его передней линзе равен  $D_n$ , то после преобразования он увеличится до  $D_T = D_n/\Gamma$ , а расходимость уменьшится до величины  $\theta_T$ :

$$\theta_T = \Gamma \theta_n [D_n/2 + (x + \Delta)\theta_n] \Gamma \Delta / F_1^2, \quad (1)$$

где  $x$  — расстояние от излучателя до общего фокальной плоскости телескопа,  $\Delta$  — величина его расстройки: расстояние между фокальными плоскостями линз 1 и 2 для расстроенного телескопа:  $\Delta < 0$  при смещении с общей фокальной плоскости в сторону излучателя 3. Чтобы придать пучку излучения лазерной технологической установки с известными параметрами  $x$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $\theta_n$  и  $D_n$  заданную расходимость необходимо ре-

шить приведенную зависимость (1) относительно величины  $\Delta$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{1,2} = 0,5 \left( \frac{D_n}{2\theta_n} + x \right) \pm \\ \pm \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{D_n}{2\theta_n} + x \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{F_1^2 \theta_T}{\Gamma \theta_n} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Телескоп необходимо расстроить на наименьшее (по модулю) значение  $\Delta$  с учетом его знака. Для устранения зависящего изменения поперечного размера пучка излучения, приводящего к деформации его каустики после преобразованного оптическим элементом (например, вследствие сферической аберрации) рекомендуется использовать второй подобный телескоп, установленный зеркально первому и расстроенный на величину  $\Delta^*$ , при которой преобразованный луч сохраняет приобретенный угол расходимости и исходный размер  $D_n$ . Её значение рассчитывается таким же образом (2) для исходных величин  $x^*$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $\theta_T^* = \theta_T$ ,  $D_T$  и  $D_n^* = D_n$ .

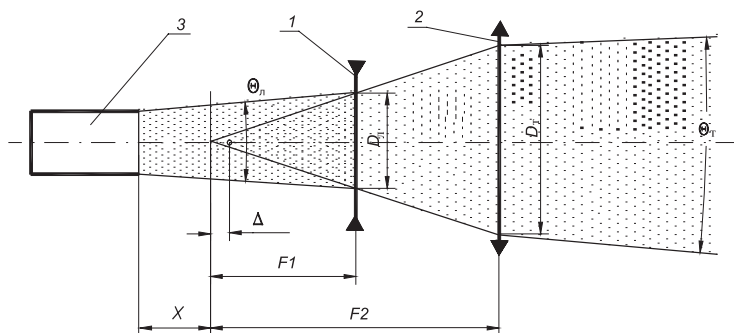


Рис. 5. Схема преобразования пучка излучения телескопом Галилея



# МАШИНЫ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

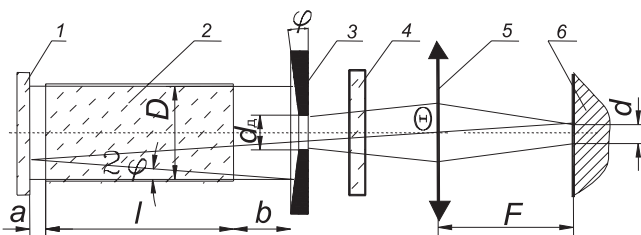
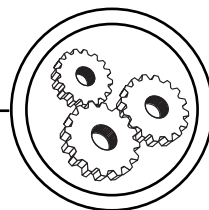


Рис. 6. Лазер с трехзеркальным резонатором для независимого изменения диаметра пучка излучения

Изменение поперечного размера пучка излучения известными внутрирезонаторными средствами связано с такими же трудностями, как и управление углом расходимости. Поэтому предлагается конструкция модовой диафрагмы (рис. 6 [9]), которая позволяет параметрически изменять диаметр пучка, сохраняя его угловые и энергетические характеристики. В разработанной конструкции диафрагма 3 обращена в третье зеркало резонатора 1-4, что позволяет часть пучка, расположенную за пределами отверстия в ней, также выводить через последнее за счет многократных отражений от зеркаль-

ной вогнутой конической поверхности диафрагмы. Это позволяет сохранить практически неизменный уровень энергии в «обрезанном» пучке. Если угол наклона поверхности диафрагмы  $\varphi$  выбран по зависимости (3), то исходная расходимость пучка диаметром  $D$  ( $\theta_D$ ) сохранится и для пучка нового размера ( $d$ ).

$$\varphi = \theta_D \left[ \frac{4(D - d_d)}{(a + b + nl)} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

На рис. 7 показаны экспериментальные результаты использования зеркальной диафрагмы. Видно, что при размерах диафрагмы  $d_d \in 4-10$  мм уро-

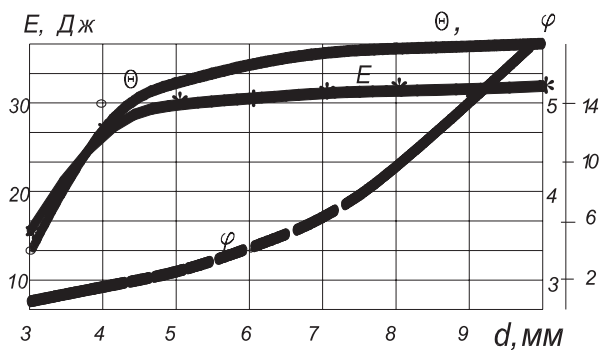
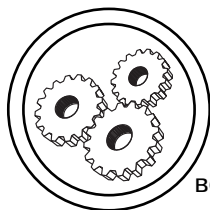


Рис. 7. Результаты параметрического управления размером пучка излучения



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

вень импульсной энергии практически неизменен 28-30 Дж, а угол расходимости принимает значения от 4,6 до 5,6 мрад. Для получения таких результатов наклон зеркальной поверхности должен быть 2-14 минут.

### Выводы

1. Экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик лазеров с разными методами управления режимом генерации показали сложный характер зависимостей параметров пучка излучения от уровней управляющей величины (параметра накачки), а также их взаимную корреляцию (рис. 1), связанную с состоянием (размерами и интенсивностью) поля накачки в активной среде.

2. Использование в практике параметрической настройки режима генерации полученных корреляционных связей не представляется возможным вследствие изменчивости последних

при замене источника накачки, активной среды, зеркал резонатора или его перестройки.

3. Хотя предложенная методика независимого управления параметрами пучка лазерного излучения может быть реализована при использовании дополнительных средств (комплекта калиброванных светофильтров, лазерных затворов, системы телескопов и набора зеркальных диафрагм специальной конструкции), ее применение оправдано при экспериментальном моделировании процесса обработки и последующей реализации разработанной операции.

4. Для широкого применения разработанной методики необходима разработка и исследование моноблока светофильтров с переменным ослаблением пучка излучения, а также узла зеркальной диафрагмы с апертурой и углом наклона отражающей поверхности, изменяемыми дистанционно.

1. Лазеры в технологии / Ф. Ф. Водоватов, А. А. Чельный, В. П. Вейко и др. — М. : Энергия, 1975. — 216 с. 2. Технологические лазеры / Справочник в 2-х томах под ред. А. Г. Абильситова. — М. : Машиностроение, 1991. 3. Welding, cutting and drilling with light. LASAG industrial-lasers. — Thun Switzerland, 2007. ISO 9001:2000 certified. 4. Laser systems: Ready for any challenge. TRUMPF. — Ditzingen Germany, 2008. — DIN EN ISO 9001 and VDA 6.4 certified. 5. Григорьянц А. Технологические процессы лазерной обработки / А. Григорьянц, И. Шиганов, А. Мисюров. — М. : Изд. МГТУ им. Н. Баумана, 2006. — 664 с. 6. Патент США № 4581515 В23К 9/00. — 06.05.86. 7. Бродский В. С. Введение в факторное планирование эксперимента / В. С. Бродский. — М. : Наука, 1976. — 224 с. 8. Куликовская Н. И. Применение системы Галилея для плавного изменения расходимости пучка, излучаемого ОКГ / Н. И. Куликовская // ОМП. — 1975. — № 12. — С. 19—21. 9. А.с. СССР № 965284 Н01S 3/08. — 08.06.82 г.

Рецензент — А. І. Жученко,  
д.т.н., професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 02.12.09