

# Лазерна розмірна обробка

## Розділ 2

### Презентація 4

електронний дидактичний демонстраційний  
матеріал

супроводження дисципліни

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ»  
(протокол №9 від "21" ТРАВНЯ 2015 р.)

**Автор: проф. Котляров В.П.**

Відповідальний редактор електронного посібника  
доц. Зоренко О.В. (ВПІ НТУУ «КПІ»)

# Розділ 2. **Методи налаштування ЛТУ**

**2.1. Юстирування резонатора  
лазера**

**През. №4, сл.№3**

**2.2. Центрування оптичної системи**

**През. №4, сл.№6**

**2.3. Методика налаштування  
технологічного режиму**

**През. №4, сл.№7**

**Додаток до розділу 2  
(завдання на СРС)**

**През. №4, сл.№25**

**Контрольні запитання та  
завдання**

**През. №4, сл.№26**

**Бібліографічний опис до  
розділу**

**През. №4, сл.№27**

## 2.1. Юстировка резонатора лазера

Процедура юстировки резонатора, тобто створення із двох (або з більшої кількості) дзеркал резонансної системи, яка являється позитивним зворотнім зв'язком, і є обов'язковою та необхідною процедурою для створення умов роботи лазера тому, що при цьому забезпечується **головна засада** формування стоячої хвилі резонатора, в якій реалізується принцип функціонування лазера – підсилення світла внаслідок **стимульованих (вимушених) переходів квантових систем**. Зважаючи на те, що в процесі створення стоячої хвилі задіяне активне середовище (підсилююча компонента 0 та елементи впливу на пучок випромінювання (модулятори, діафрагми, тощо), то процесу юстировки підлягають і ці деталі лазера.

В зв'язку з **відсутністю в довідковій та методичній літературі** описаного алгоритму налагодження (юстировки) елементів випромінювача, які знаходяться у резонаторі, а також **центрування силової оптичної системи** та орієнтації установочних елементів технологічного модулю відносно інструменту – пучка випромінювання – наведемо порядок та опишемо додаткові елементи, необхідні для виконання загальної процедури налагодження ЛТУ.

Для **юстировки робочого випромінювача з квантроном 1** (рис. 2.1) використовується додатковий малопотужний лазер 11, наприклад, газовий *He-Ne* (ЛГ-208) або напівпровідниковий лазер з випромінюванням у видимій частині спектру ( $Al_xGa_{1-x}As$  з довжиною хвилі  $\lambda = 0,62$  мкм), який розташовується на предметному столику 12 за 100% дзеркалом 5 резонатора лазера. **Вихідне вікно** лазера 11 обмежується екраном 10 з непрозорого матеріалу, в якому виготовлений отвір  $\varnothing 0,2 \div 0,3$  мм для збільшення спрямованості променя.

Порядок дій при юстировці наступний:

1. Відключити робочий випромінювач 2 від мережевих джерел живлення.
2. Зняти з випромінювача 2 кожух, від'єднати кабелі від ламп накачування 3 квантрону 1 і променеві проводи, відключити систему охолодження.

## 2.1. Юстировка резонатора лазера

- Зняти оптичну систему 15, вузол вихідного дзеркала 9, вузол 100% дзеркала 5 з вимірювачем енергії 17 та додаткові елементи, які розташовано у резонаторі – модулятор 7, модову діафрагму 8, та поза ним – заслінку 6.
- За допомогою предметного столика 12 додаткового лазера 11, використовуючи його ступені свободи, направити промінь останнього уздовж осі активного елементу 2 квантрона 1 таким чином, що б відбитий від центрів його торців промінь повернувся у отвір екрану 10.
- Встановити вузол заслінки 6 в корпус випромінювача 4, забезпечуючи потрапляння відбитого від дзеркала заслінки 6 променя (при її закритті) у центр поглинача лазерної енергії (складова частина заслінки).

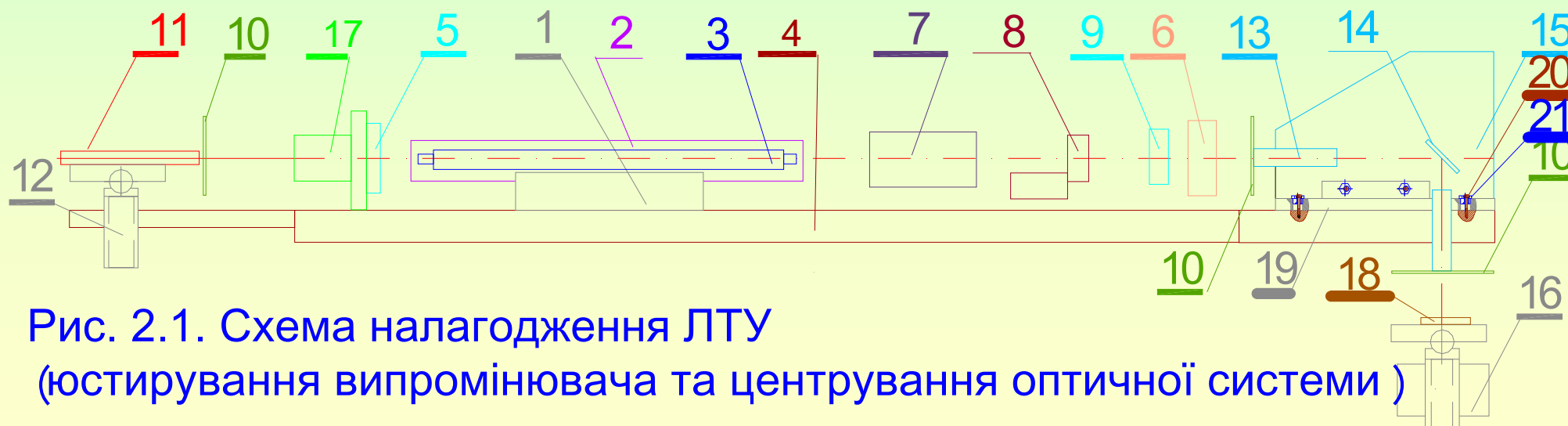


Рис. 2.1. Схема налагодження ЛТУ

(юстирування випромінювача та центрування оптичної системи )

## 2.1. Юстировка резонатора лазера

6. Встановити вузол вихідного дзеркала 9 на основу 4 і гвинтами юстировочного механізму направити відбитий від робочої поверхні дзеркала 9 промінь додаткового лазера 11 в отвір екрану 10, встановлений на додатковому лазері 11.
7. Установити (по черзі) на основу 4 вузол діафрагми 8 та модулятор 7, забезпечуючи проходження проміню додаткового лазера 11 через їх центри.
8. Встановити на основу 4 вузол 100% дзеркала 5 (без датчику вимірювача лазерної енергії 17) і повторити дії п. 6.
9. Підключити системи живлення квантрону (накачування і охолодження), встановити променеві проводи, включити робочий випромінювач.
10. При мінімальному значенні розрядного струму, що викликає генерацію, (порогу генерації) регулюванням кутового положення вихідного дзеркала 9 добитися максимальної яскравості і рівномірності розподілу випромінювання по плямі на пристрої для його візуалізації або на засвіченому та проявленому (заздалегідь) фотографічному папері, який розташовується на оптичній осі випромінювача.
11. Після отримання бажаної якості пучка випромінювання (за оцінкою по сліду, залишеному на візуалізаторі) скорегувати (в разі необхідності) положення додаткового лазера 11 шляхом його паралельного переміщення столиком 12.
12. Вимкнути живлення робочого лазера і закрити випромінювач кожухом.

## 2.2. Центрування оптичної системи ЛТУ

Для *центрування* оптичної системи необхідно (рис.2.1):

1. Оптичну систему 15 (СОК-1) необхідно установити на основі 4 (бажано на юстировочну підставку 19) з розташованими на передній лінзі телескопу 13 і на вихідному вікні системи екранів 10 з отворами діаметром порядку 0,3 – 0,4мм.
2. Використовуючи прокладки під корпус оптичної системи 15 або ексцентричні елементи підставки 20 і 21, переміщують його в поперечному напрямі за рахунок люфтів у вузлах кріплення або ексцентричність пари 20 - 21, при чому виконуючи кутові переміщення поворотного дзеркала 14, що змушує промінь додаткового лазера проходити крізь отвори в обох екранах 10.
3. Правильність центрування оцінюється при переміщенні рухливої компоненти телескопу (негативної чи позитивної лінзи): **промінь додаткового лазера** не повинен зміщуватися з осі отвору в екрані 10 на вихідному вікні оптичної системи.
4. Для виставлення нормального положення робочого столика 16 до осі променя на його поверхні розташовують пластину 18 з дзеркальної поверхнею і, використовуючи його кутові ступені свободи добиваються попадання відбитого від неї променя в отвір екрану 10 на вихідному вікні оптичної системи.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Вступ

В технологічних операціях лазерної розмірної обробки необхідний **позитивний ефект** досягається за рахунок додання пучку випромінювання необхідних енергетичних, часових і просторових характеристик, що забезпечують необхідний рівень інтенсивності  $I_p$  в зоні опромінення:

$$I_p = P/S = 4E/(\pi d_0^2 t) \text{ – для нерухомого проміня} \quad (2.1);$$

$$I_p = P/S = E/St = E/[(\pi d_0/4 + Vt)d_0 t] \text{ – при відносному переміщенні проміня та заготовки із швидкістю } V \quad (2.2),$$

де:  $S$  – площа та  $d_0$  – діаметр зони опромінення: ( $d_0 = F\theta + \Delta F D/F$ ),  $F$  – фокусна відстань лінзи,  $\Delta F$  – розміщення поверхні заготовки в каустиці пучка випромінювання,  $D$  – діаметр пучка випромінювання

Для кількісної зміни рівня  $I_p$  необхідно мати можливість управління або контролю над рівнями параметрів обробки:

- енергетичних  $E, P$ ;
- часових  $t(\tau)$ ;
- просторових  $\theta, D$ ;
- умов опромінення  $V, F, \Delta F$ .

Тільки останні **взаємозалежні** і можуть змінюватися параметрично; інші, завдячуючи механізму формування пучка в резонаторі, змінюються одночасно при впливі на режим накачування активного середовища.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Якщо параметри останньої групи характеристик взаємно незалежні і, внаслідок цього, можуть набувати будь-яких значень, то параметри пучка випромінювання при їх зміні штатними методами набувають залежних значень, тобто вони взаємно корельовані. Внаслідок цього стає неможливим точне налаштування режиму обробки, а також управління станом об'єкту – процесу лазерної обробки – в експериментальних дослідженнях за всілякими методиками. Для усунення цих труднощів необхідно:

- встановити дійсний вплив штатного регулювальника режиму роботи лазера на параметри пучка випромінювання;
- розробити методику параметричного управління пучком випромінювання, що враховує характер дійсного впливу використовуваного регулювальника;
- застосувати відомі або розробити нові засоби для додаткового і керованого впливу на режим генерації лазера.

Аналіз конструкцій лазерного технологічного устаткування (ЛТУ) відомих у минулому виробників [33] і сучасних [34, 35] показав, що, не дивлячись на істотні якісні зміни, в першу чергу, випромінювача, принцип управління режимом його роботи залишився незмінним – діяння на процес збудження активного середовища.

Для лазерів з імпульсним накачуванням управління зводиться до зміни рівня і частоти подачі енергії накачування до джерел збудження активного середовища (до лампи накачування або лінійок діодів – для лазерів на твердому активному середовищі) або за рахунок зміни напруги або ємкості накопичувача. Хоча така дія на режим генерації призводить до одночасної зміни часових і просторових характеристик пучка випромінювання, можлива додаткова дія на тривалість імпульсу перебудовою розрядного контуру  $L$ - $C$  джерела струму.



## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Режим роботи лазерів з безперервним накачуванням змінюється дією на розрядний струм через діоди або лампу накачування (лазери на твердому активному середовищі) або в газорозрядній камері (газові лазери). Для безперервного режиму генерації це призводить до одночасної зміни просторових характеристик пучка випромінювання (діаметру пучка, його модового складу і кута розбіжності). При імпульсному виведенні енергії з резонатора за рахунок використання лазерних затворів (внутрішніх модуляторів добротності резонатора), що дозволяє середню потужність випромінювання перерозподіляти між пічками, змінюючи частоту і шпаруватість їх генерації, зміна потужності накачування також впливає на просторові характеристики пучка випромінювання.

Така вимушена залежна дія на ряд параметрів пучка випромінювання призводить до непередбаченої зміни інтенсивності в зоні опромінення і, отже, до такої ж дії на процес обробки і його результати.

Таким чином, приведені вище заходи щодо усунення труднощів налаштування технологічного устаткування на робочий режим, необхідні також для підвищення керованості і визначеності рівнів параметрів пучка випромінювання, що налагоджуються, у тому числі, комплексної характеристики – інтенсивності випромінювання.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### 2.3.1. Експлуатаційні характеристики лазерів ЛТУ

Такими характеристиками зазвичай є залежності енергетичних, просторових і часових характеристик від рівня керованого (регульованого) чинника. Такі залежності можуть бути отримані як в результаті класичних (одно факторних), так і багатofакторних експериментів. У зв'язку з тим, що метою досліджень є здобуття ряду залежностей при зміні одного чинника, який керує процесом генерації, доцільно використовувати одно факторну стратегію, що дозволить фізично інтерпретувати отримані результати. Приклад таких залежностей для ряду технологічних лазерів з імпульсним накачуванням активного елементу показано на рис. 2.2. Можна відзначити, що при будь-якому з методів зміни енергії накачування (напругою на накопичувальному конденсаторі формуючої лінії накачування (ФЛН)  $U_n$  або величиною його ємності  $C$ ) очевидний зв'язок між тривалістю імпульсу і його енергією, причому в одному випадку при зростанні енергії в 4 рази потужність випромінювання збільшується в 2,33 (крива 1), а в іншому (крива 2) - збільшення складає 1,08 (при зростанні енергії в 1,3). Якщо врахувати, що при цьому також змінюються просторові характеристики пучка випромінювання (його діаметр  $D$  і кут розбіжності  $\theta$  - рис. 2.2), то відповідно до залежностей (2.1) і (2.2) інтенсивність в зоні опромінення буде знижуватися, а не збільшуватися, як можна було передбачити. Залежності, приведені на рис. 2.2, лише свідчать про складний вплив використовуваного методу управління на режим генерації лазера, але не визначають шляху параметричного управління характеристиками пучка випромінювання.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

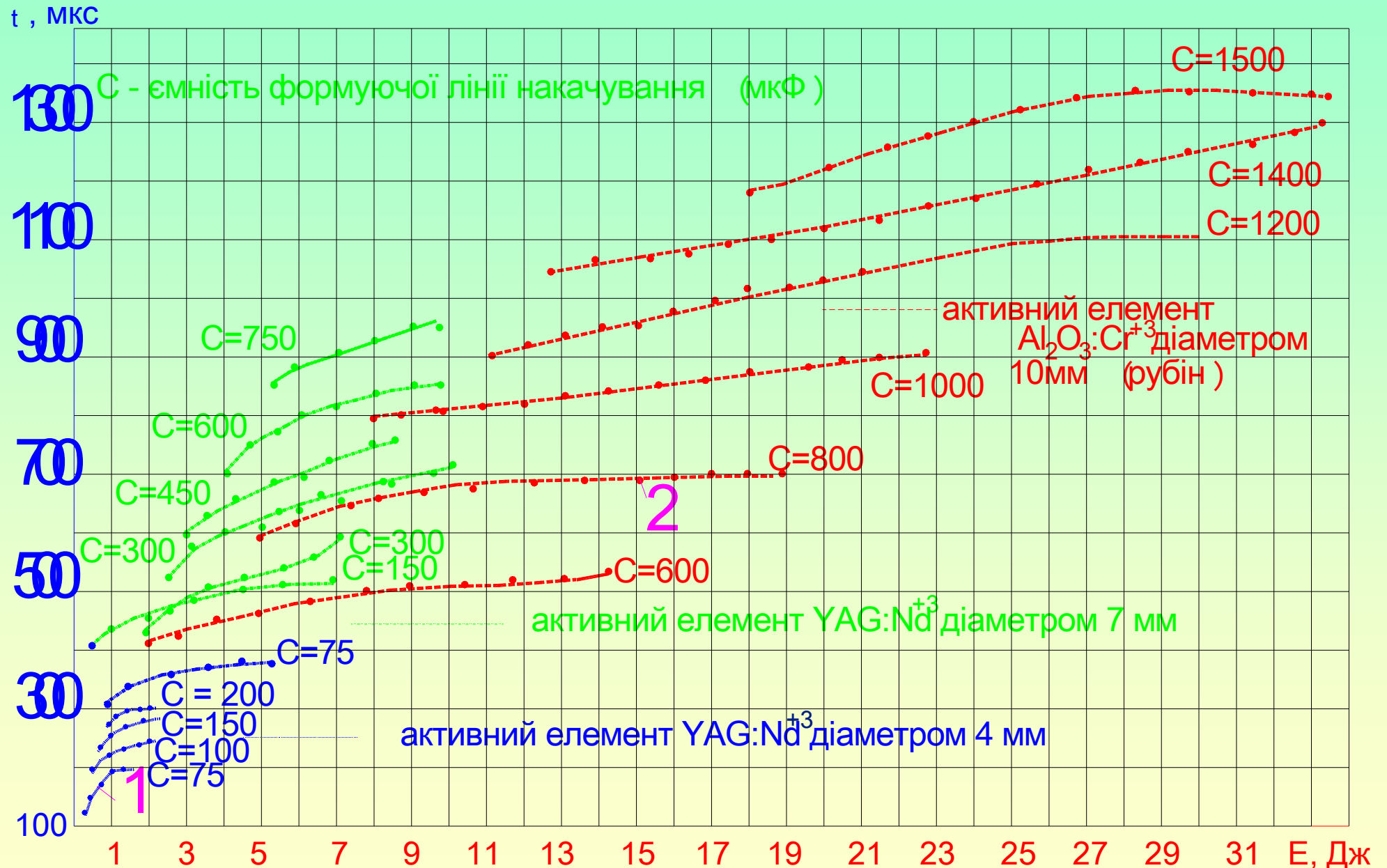


Рис.2.2. Експлуатаційні характеристики технологічних лазерів

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Розглянувши **детальніше дію енергії накачування** при будь-якому способі її зміни окремо на кожен параметр пучка випромінювання можливо створити методику параметричного керування **енергетичними параметрами випромінювання**, часовими характеристиками

На рис.2.3 наведено експериментальні залежності **імпульсної енергії  $E$** , тривалості імпульсу  $\tau$  і **кута розбіжності пучка випромінювання  $\theta$**  для лазера на гранаті з ламповим імпульсним накачуванням, а на рис.2.4 – потужності  $P$ , діаметру  $D$  і **кута розбіжності пучка випромінювання  $\theta$**  для лазера на гранаті з ламповим безперервним накачуванням (ЛТН-102). Їх аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

- **монотонне зростання** енергетичних характеристик випромінювання ( $E$  і  $P$ ) **пояснюється** як збільшенням об'єму активного середовища з інверсною заселеністю домішкових часток ( $Nd^{+3}$ ), так і підвищенням міри інверсії в накачаному об'ємі;
- **діафрагмування** поперечного перетину активного середовища декілька міняє вигляд залежності, оскільки з деякого рівня накачування дія першої причини зростання енергії припиняється і остання залежить лише від кількості збуджених часток в об'ємі активного середовища, перетин якого обмежено діафрагмою  $D_0$ ;

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

- тривалість імпульсу випромінювання  $\tau$  міняється внаслідок зміни темпу наростання рівня інверсії в активному середовищі і із-за цього - раннього перевищення і пізнього зниження її нижче за поріг генерації, що сильніше позначається при низьких рівнях енергії накачування і призводить до досягнення тривалістю деякого граничного значення при максимальному її рівні;
- подібну залежність має кут розбіжності пучка випромінювання  $\theta$ , проте, причиною цього є збільшення поперечного розміру активного середовища, накачаного вище за поріг генерації, що призводить до підвищення індексу поперечної моди ( $m$  або  $n$ ), на якій можлива генерація, і при максимальному рівні накачування досягається найбільша розбіжність пучка;
- діафрагмування поперечного перетину активного середовища призводить до зменшення кута найбільшої розбіжності (знижується індекс  $m$  або  $n$ ), проте, характер залежності зберігається;
- поперечний розмір пучка випромінювання  $D$  також залежить від його модового складу, тому досягає максимального значення при досягненні порогового рівня накачування у всьому об'ємі активного середовища, подальше його зростання практично не змінює розмір пучка.

Приведені залежності не лише демонструють неоднозначність впливу енергії накачування на параметри пучка випромінювання, але також дозволяють виявити деякі їх особливості, які можна використовувати при рішенні задачі параметричного управління пучком випромінювання.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

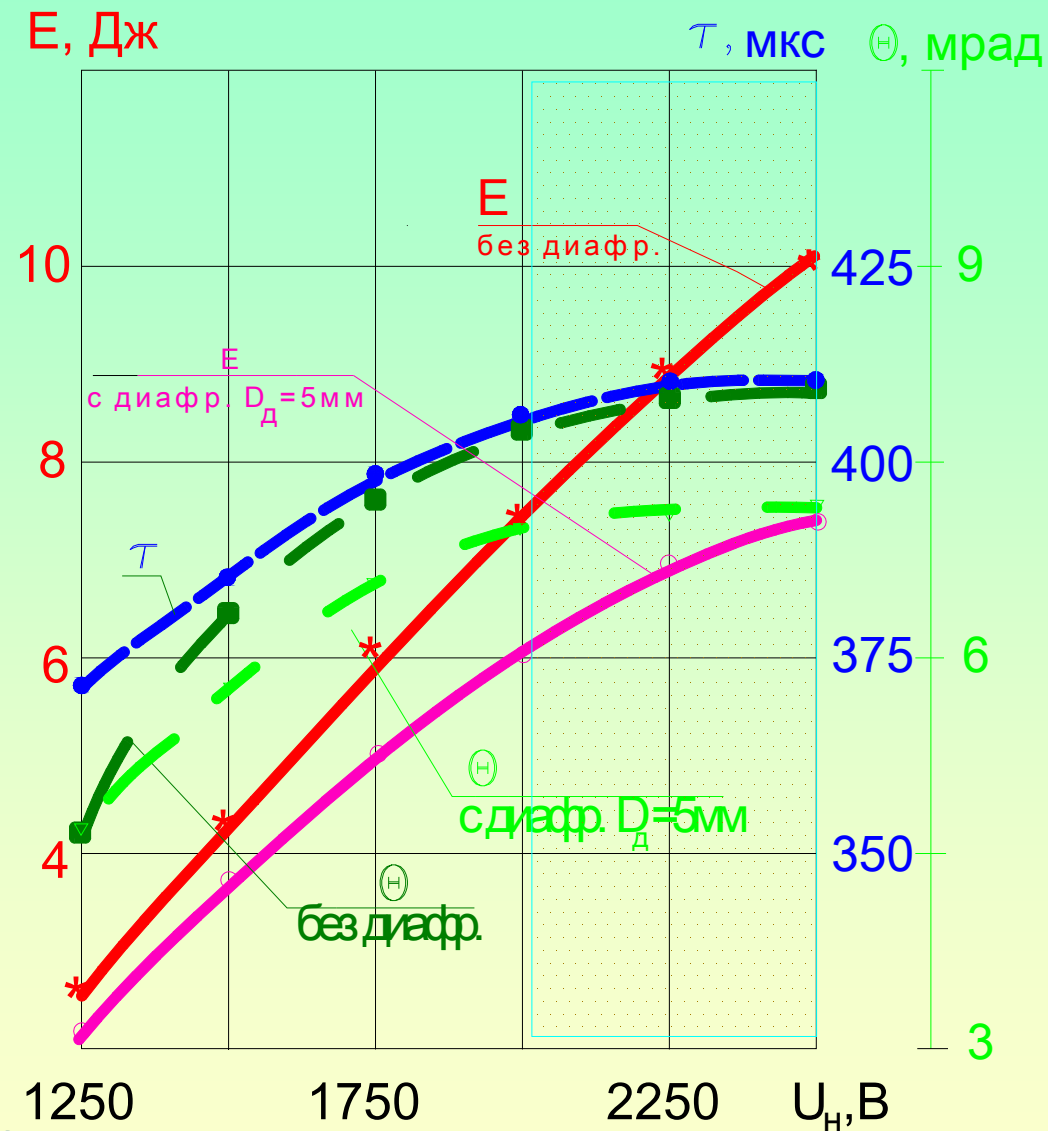


Рис 2.3. Експлуатаційні характеристики випромінювача на гранаті при управлінні напругою накачування лампи

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

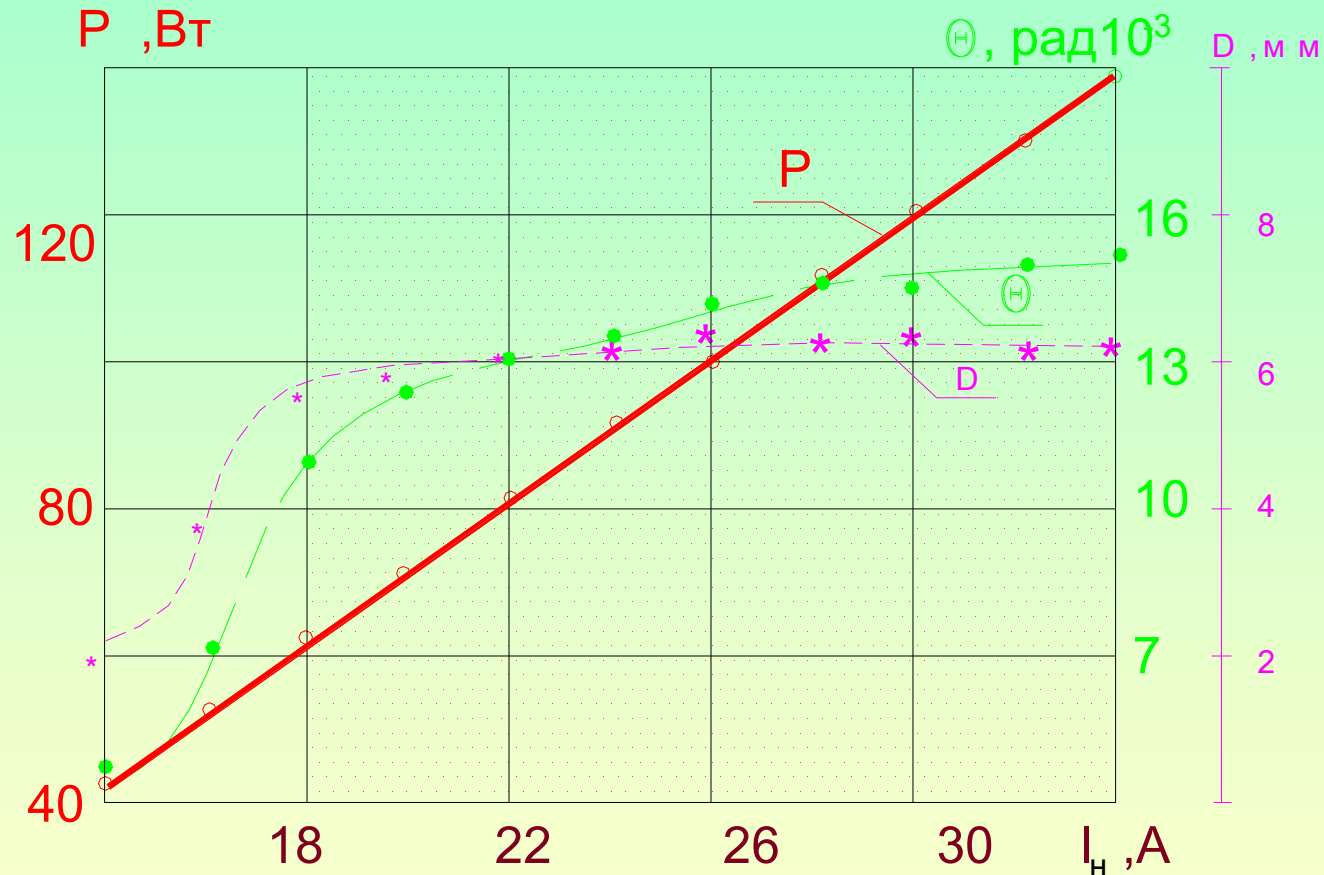


Рис.2.4. Експлуатаційні характеристики випромінювача ЛТН-102 при управлінні ступенем накачування

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Методика незалежного (параметричного) управління пучком лазерного випромінювання

Для управління енергією (потужністю) пучка випромінювання, крім зміни рівня енергії накачування, найчастіше застосовують його діафрагмування і атенюацію (ослаблення).

Якщо за першим методом (діафрагмуванням) це не впливає на тривалість імпульсу, то розмір пучка і кут його розбіжності змінюються істотно (рис.2.3), що, природно, впливає на рівень інтенсивності в зоні опромінення і може привести до неочікуваного впливу на процес обробки. Тому будь-які відомі конструкції діафрагм не можуть бути рекомендовані для незалежної зміни рівня енергії (потужності) випромінювання.

Для ослаблення пучка випромінювання зазвичай використовують поглинаючі (нейтральні) або дзеркальні світлофільтри (інтерференційні дзеркала), що забезпечують вибірккову дію на пучок випромінювання: просторові (кут розбіжності і поперечний розмір) і часові його параметри залишаються практично незмінними. Деяку незручність складає дискретний характер зміни рівня енергетичного параметра з кроком, який визначається інтервалом зміни коефіцієнта поглинання (віддзеркалення) у використуваного набору світлофільтрів.

Для усунення цього недоліку пропонується оригінальна методика комплексної дії на пучок випромінювання, яка заснована на ослабленні пучка світлофільтрами і використанні ефекту насичення таких його параметрів як тривалість імпульсу (рис.2.3), діаметр пучка (рис. 2.4) і кут розбіжності (рис.2.3 і 2.4) при достатньо високому рівні збудження активного середовища.



## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Методика незалежного (параметричного) управління пучком лазерного випромінювання

Вона призначена для налаштування певного набору параметрів пучка випромінювання, які разом з умовами опромінення складають режим обробки в технологічній операції або для розмірного варіювання чинників (параметрів пучка випромінювання) на декількох рівнях при експериментальних методах моделювання процесу обробки або його оптимізації [36]. Розроблена методика складається з наступних процедур:

- проектування (модернізація) резонатора технологічного лазера (співвідношення кривизни дзеркал і їх взаємного розташування) для формування пучка випромінювання із заданими просторовими характеристиками при використанні в ньому вибраного активного середовища (з врахуванням його розмірів);
- модернізація ФЛН (ємкості  $C$  і індуктивності  $L$  її розрядного контуру) для генерації імпульсу випромінювання заданої тривалості;
- експериментальне дослідження розробленого (модернізованого) випромінювача з метою визначення його експлуатаційних характеристик (імпульсної енергії, тривалості і кута розбіжності пучка випромінювання), подібних до залежностей рис.2.2;
- вибір рівнів варіювання керованого параметра (енергії  $E$ ), визначення рівня енергії накачування (напряга  $U_n$  на обкладинках ємкості  $C$ ), вище за яку зміна тривалості, розміру і кута розбіжності пучка випромінювання незначна;
- підбір світлофільтрів для «грубої» зміни енергії випромінювання і рівня енергії накачування для «тонкого» її регулювання до необхідного рівня.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Приклад налаштування режимів генерації лазера

На прикладі налаштування режиму роботи випромінювача, експлуатаційні характеристики якого приведені на рис.2.3, виконаємо реалізацію запропонованого принципу вибору режиму генерації для зміни імпульсної енергії на трьох рівнях 4,0; 6,5 і 9,0 Дж в експерименті по багато факторній методиці (рис.2.5). Виходячи з допустимих варіацій тривалості імпульсу ( $\pm 2\% \tau$ ) і кута розбіжності ( $\pm 5\% \theta$ ), за граничне значення напруги накачування, після якої мінливістю цих параметрів випромінювання нехтують (на рис.2.3. зону виділено золотавим кольором), можна прийняти рівень  $U_H^* = 1850$  В. Тоді III рівень енергії (9,0Дж) можна отримати при  $U_{H3} = 2260$ В, II рівень (6,5Дж) – при  $U_{H2} = 2400$  В з використанням світлофільтру НС-1 з коефіцієнтом ослаблення  $k_{осл} = 1,46$  і I рівень (4,0Дж) – при  $U_{H1} = 2300$  В при світлофільтрі НС-2 з  $k_{осл} = 2,12$ . Світлофільтри були вибрані з стандартного їх набору.

Для дискретного, але незалежного управління тривалістю імпульсів випромінювання можна використовувати в джерелах живлення лазера ФЛН типу «драбина» [37], яка є послідовністю декількох вічок (розрядних контурів з елементами  $C_e$  і  $L_e$ ). Зміною кількості включених вічок  $n$  управляють тривалістю імпульсу відповідно до залежності , де  $\tau_e$  - тривалість імпульсу випромінювання при використанні одного вічка. Імпульсна потужність при такому управлінні підтримується на одному рівні.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Приклад налаштування режимів генерації лазера

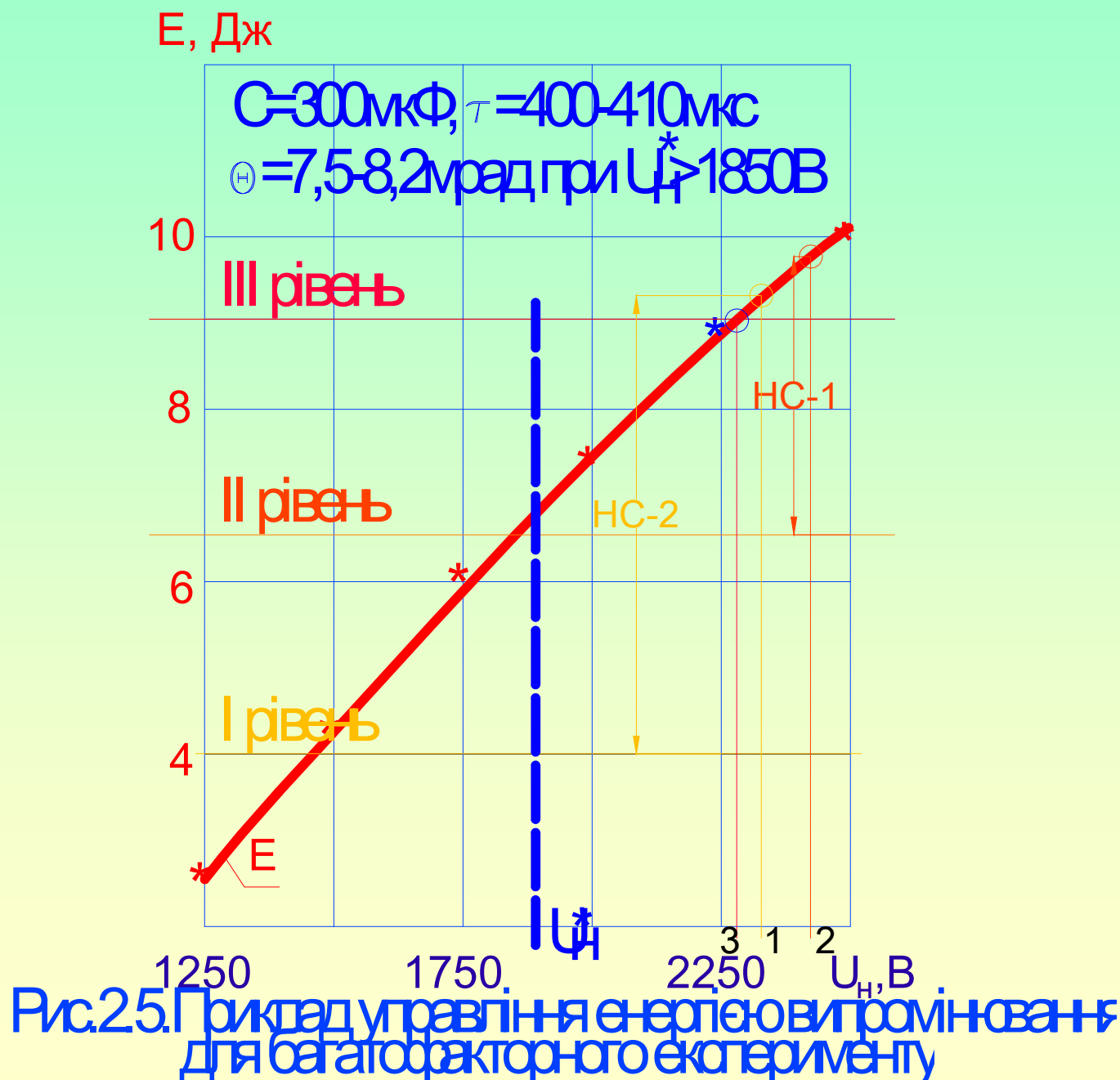


Рис.25. Приклад управління енергією випромінювання для багатфакторного експерименту

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Приклад налаштування режимів генерації лазера

При безперервному накачуванні активного середовища і формуванні імпульсного випромінювання лазерними затворами його часовий характер встановлюється параметрами роботи затвору. Зовнішня модуляція пучка випромінювання застосовується рідко у зв'язку з низькою її ефективністю, що пов'язано з втратою енергії в частині пучка, що відсікається.

Кут розбіжності пучка випромінювання визначається конфігурацією резонатору лазера і типом активного середовища:

$$\theta_{00} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad \text{- для одномодового пучка } TEM_{00}$$
$$\theta_{mn} = 2,44 \frac{\lambda}{2w_0} \quad \text{- для багато модового пучка } TEM_{mn}$$

де:  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера,  $w_0$  – радіус перетяжки каустики в резонаторі. Вочевидь, що оперативне управління кутом розбіжності пучка випромінювання дією на параметри резонатору можливо при оснащенні останнього спеціальними елементами, такими як дзеркала адаптивної конструкції, механізмом дистанційної зміни довжини резонатора і його поперечного перетину. У зв'язку з тим, що подібні елементи використовуються рідко, для управління кутом розбіжності застосовують зовнішню оптичну систему у вигляді одиночної лінзи або телескопа (Галілея, Кеплера, Кассегрена). Афокальний телескоп Галілея (рис.2.6) переважний у зв'язку з відсутністю явної фокальної області з підвищеним рівнем інтенсивності випромінювання. Основною характеристикою телескопа є його лінійне збільшення. Якщо діаметр пучка випромінювання на його передній лінзі рівний  $D$ , то після

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Приклад налаштування режимів генерації лазера

перетворення він збільшиться до  $D_m = D/\Gamma$ , а кут розбіжності зменшиться до величини  $\theta_m$ :

$$\theta_T = \Gamma \theta_B \left[ \frac{D}{2} + (x + \Delta) \theta_B \right] \Gamma \Delta / F_1^2 \quad (2.1)$$

де:  $x$  – відстань від випромінювача до загальної фокальної площини телескопу,  $\Delta$  - величина його розладу: відстань між фокальними площинами лінз 1 і 2 для розладженого телескопу: ( $\Delta < 0$  при зсуві із загальної фокальної площини у бік випромінювача 1). Аби додати пучку випромінювання лазерної технологічної установки з відомими параметрами  $x$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $\theta_B$  і (2.1) відносно величини  $\Delta$  (2.2). Телескоп необхідно розладнати на найменше (по модулю) значення  $\Delta$  з врахуванням його знаку. Для усунення залежної зміни поперечного розміру пучка випромінювання, що наводить до деформування його каустики після перетвореного оптичним елементом (наприклад, унаслідок сферичної аберації) рекомендується використовувати другий подібний телескоп, встановлений дзеркально першому і розладжений на величину  $\Delta^*$ , при якій перетворений промінь зберігає придбаний кут розбіжності і вихідний розмір  $D$ . Її значення розраховується так само для вихідних величин  $x^*$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $\theta_m = \theta_B$ ,  $D_m$  і  $D_m = D$ .

$$\Delta_{1,2} = 0,5 \left( \frac{D}{2\theta_B} + x \right) \pm \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{D}{2\theta_B} + x \right)^2 + \left( \frac{F_1^2 \theta_T}{\Gamma \theta_B} - F_1^2 \right) \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Приклад налаштування режимів генерації лазера

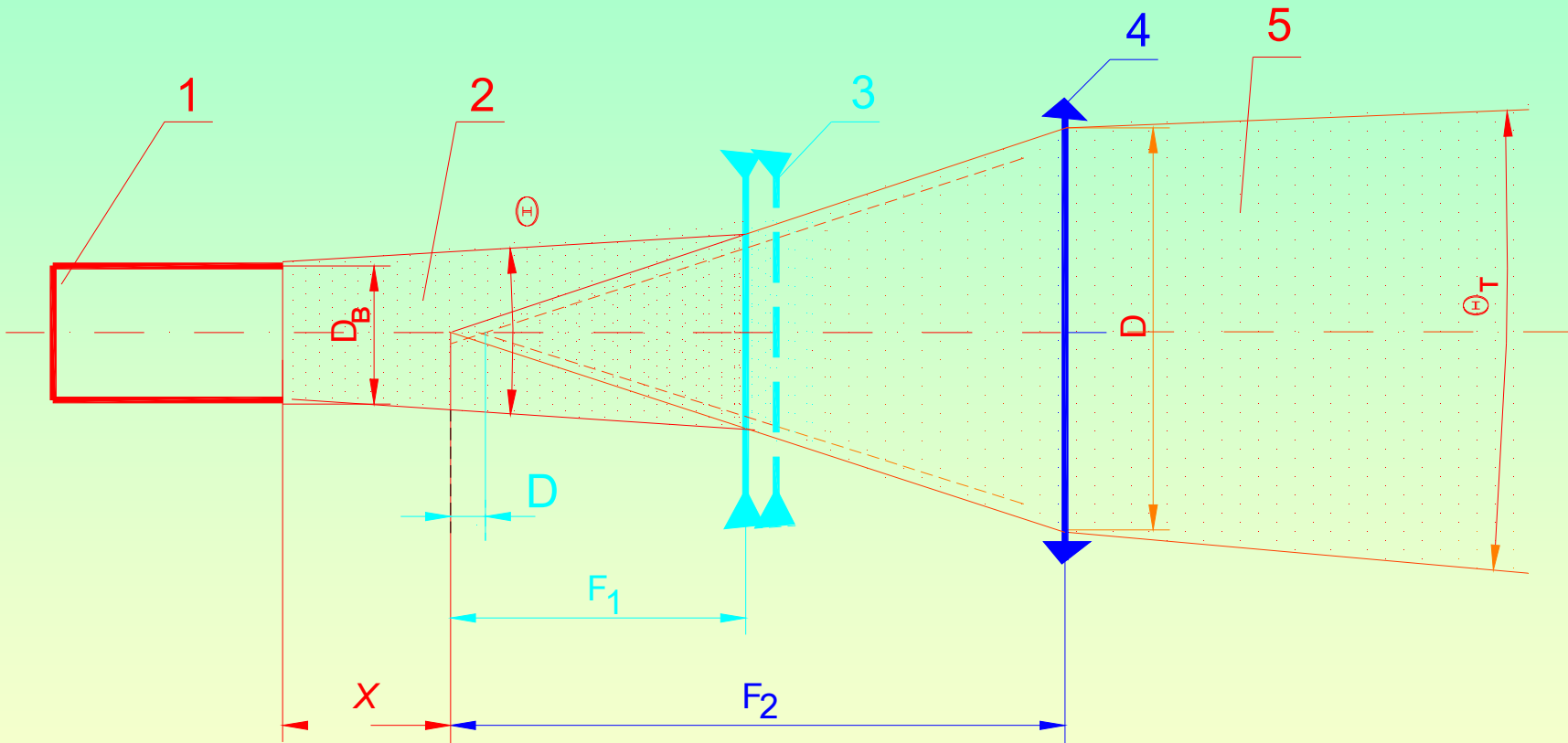


Рис.2.6. Перетворення телескопом Галілея пучка лазерного випромінювання

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

### Приклад налаштування режимів генерації лазера

Зміна поперечного розміру пучка випромінювання відомими внутрішньо резонаторними засобами пов'язана з такими ж труднощами, як і управління кутом розбіжності. Тому пропонується конструкція модової діафрагми (рис.1.27 През.2, сл.№28) [12], яка дозволяє параметрично змінювати діаметр променя, зберігаючи його кутові і енергетичні характеристики. У розробленій конструкції діафрагма 3 обернена в третє дзеркало резонатора 1 – 4, що дозволяє частину пучка, розташовану за межами отвору в ній, також виводити через останній за рахунок багатократних віддзеркалень від дзеркальної увігнутої кінчної поверхні діафрагми. Це дозволяє зберегти практично незмінний рівень енергії в «обрізаному» промені. Якщо кут нахилу поверхні діафрагми  $\varphi$  вибраний по залежності (2.3), то вихідний кут розбіжності пучка діаметром  $D$  ( $\theta_D$ ) збережеться і для пучка нового розміру ( $d$ ).

$$\varphi = \theta_D \left[ \frac{4(D - d_d)}{(a + b + nl)} \right]^{-1/2} \quad (2.3)$$

На рис. 2.7 показані експериментальні результати використання дзеркальної діафрагми. Видно, що при розмірах діафрагми  $d_d$  ( $d_d \in 4 - 10$  мм) рівень імпульсної енергії практично незмінний 28 - 30 Дж, а кут розбіжності набуває значень від 4,6 до 5,6 мрад. Для здобуття таких результатів нахил дзеркальної поверхні має бути 2 – 14 хвилин.

## 2.3. Методика налаштування технологічного режиму

Приклад налаштування режимів генерації лазера

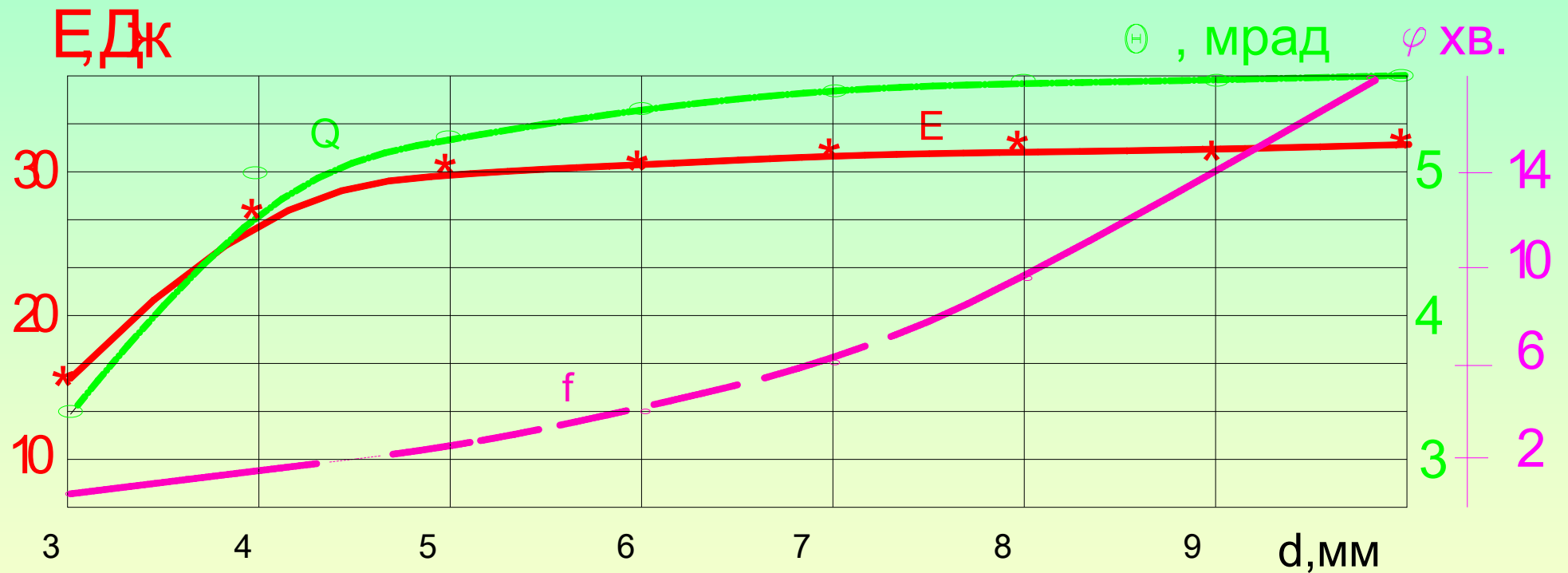


Рис.2.7. Результати параметричного управління розміром пучка випромінювання



## Додаток до розділу 2 (завдання на СРС)

1. Завдання на СРС 1: Три метода впливу на енергетичні параметри пучка випромінювання. Описати та визначити - який з них має параметричний характер впливу на пучок? Пояснити причини їх діяння.

2. Завдання на СРС 2: Які відомі аналогові засоби налагодження положення заготовки у каустиці пучка. Визначити недоліки та порівняти з характеристиками налагодження за подвійним зображенням.

3. Завдання на СРС 3: Навести конструкції формуючих ліній накачки лазерів. Які конструкції дозволяють параметрично змінювати тривалість лазерного імпульсу?

4. Чим визначається кут розбіжності пучка лазерного випромінювання? Які резонаторні та поза резонаторні засоби впливу на нього мають параметричний характер зміни властивостей пучка?

## *Контрольні запитання та завдання*

1. Яким чином зазвичай керують режимом роботи лазера і до яких наслідків це приводить?
2. Мотивуйте необхідність незалежного впливу на кожен параметр пучка випромінювання і чому потрібні для цього особливі методи налаштування режиму роботи лазера?
3. Через які механізми енергія накачування багатосторонньо впливає на енергію імпульсу випромінювання?
4. Який принцип покладено в основу параметричного керування енергетичними параметрами випромінювання?
5. Якими засобами можна впливати на тривалість імпульсу випромінювання?
6. Якими засобами в резонаторі і поза ним можна впливати на кут розбіжності пучка випромінювання?
7. Чи можна параметрично (без впливу на енергію та розбіжність) змінювати поперечний розмір пучка випромінювання?

## **Бібліографічний опис до 2 розділу**

33. Водоватов Ф. Ф. Лазеры в технологии [Текст] / Ф. Ф. Водоватов, А. А. Чельный, В. П. Вейко. – М. : Энергия, 1975. – 216с. ил. : 20 см. – 9 000 экз.
34. Вейко В. П. Лазерная микрообработка [Текст] : конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий» / В. П. Вейко. –СПб. : ГУ ИТМО, 2007. – 111 с. ил. ; 20 см. – 200 экз
35. Laser processing head ВАК 4. – Catalogue Lasag – the company brochure [Текст] / ([www//lasers@lasag.ch](http://www//lasers@lasag.ch)), 2008. – 4р. : ил.
36. Душинский В. В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении [Текст] / В. В. Душинский, Е. С. Пуховский, С. Г. Радченко. – Киев : Техніка, 1977. – 176 с. : ил. ; 20 см. — 2500 экз.
37. Технологические лазеры. / Справочник в 2-х томах под ред. А.Г.Абильситова. - М: Машиностроение, 1991 г.