

УДК 62-5

**ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ВИСОТИ У СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОГО
РІЗАННЯ МЕТАЛІВ****Власенко О. І., Пилипенко Ю. М.**

Київський національний університет технологій та дизайну

Мета. Розглянути можливість впровадження пристрою контролю висоти, що використовує ємнісний датчик на базі сігма-дельта АЦП.

Методика. У роботі використані методи системного аналізу, математичного та аналітичного моделювання.

Результати. Досліджено фактори, які впливають на роботу устаткування лазерного різання металів та виявлено спосіб, як за незначних витрат покращити показники ефективності процесу різання металів. Досліджено можливість використання ємнісних датчиків на базі сігма-дельта АЦП для покращення показників процесу лазерного різання металів.

Наукова новизна. Використання ємнісного датчика для вимірювання зазору в станках лазерного різання металів з використанням сігма-дельта АЦП.

Практична значимість. Підвищення швидкості виготовлення деталей та покращення їхньої якості.

Ключові слова: ємнісний датчик, система лазерного різання металів, контроль висоти, слідкування, сігма-дельта АЦП

Оснащення українських підприємств сучасним високотехнологічним обладнанням – одна із основних та першорядних задач, яка є на даний момент, що найбільш актуально при високому рівні зносу основних фондів у вітчизняній промисловості. На даний момент лазер вдало виконує цілу низку технологічних операцій, передусім таких як, різання, зварювання, свердлення отворів, термічна обробка поверхонь, скрайбування, маркування, гравірування тощо.

У цій роботі ми розглянемо інформацію про те, як вдосконалити процес різання. Лазерне різання металів активно застосовується у промисловості і складає 35% усього промислового використання лазера. Лазерне різання – найбільш оптимальний та технологічний спосіб обробки різноманітних видів металу. Конкурентами даного способу є механічне різання з використанням полотен, абразивів і фрез, газокисневе і плазмове різання. Але, у порівнянні з традиційними методами, використання лазера при обробці тонких листів металів, має ряд беззаперечних переваг:

- можливість отримання тонких розрізів, завдяки гострому фокусуванню лазерного променя;
- малу зону термічного впливу випромінювання;

- мінімальний механічний вплив, що здійснюється на матеріал;
- можливість швидкого ввімкнення та вимкнення пристрою з високою точністю;
- хімічна чистота процесу різання;
- можливість автоматизації процесу та отримання високої продуктивності;
- можливість різання по складному профілю у двох або навіть трьох вимірах [2].

Постановка завдання

Метою даної роботи є дослідження процесів, які впливають на роботу верстатів лазерного різання металів та виявлення малозатратного способу покращення показників ефективності процесу різки металів.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- 1) виявити показники ефективності процесів лазерної різки металів;
- 2) дослідити фактори, що впливають на показники ефективності;
- 3) зробити огляд існуючих датчиків, що використовуються в пристроях контролю висоти;
- 4) дослідити можливість використання ємнісних датчиків на базі сігма-дельта АЦП для підвищення швидкодії, завадостійкості систем лазерного різання та покращення якості різки.

Розглянемо основні параметри та показники процесу лазерного різання. Для процесу лазерного різання металів можна виділити основні фактори, що визначають продуктивність і якісні показники процесу. Серед них важливими є: густина потужності лазерного випромінювання, швидкість різання, тиск і склад допоміжного газу, що подається, поглинальна здатність поверхні матеріалів, вид і властивості, металів, що піддаються обробці. Густина потужності, що підводиться до зони обробки залежить, в свою чергу, від потужності лазерного випромінювання, його модового складу, поляризації і умов фокусування (фокусної відстані лінз, величини і напрямку розфокусування).

Через ряд причин, області режимів, що забезпечують високу якість кромки різання і високу ефективність процесу, у процесі лазерного різання металів часто не співпадають.

Параметри отриманого різки при лазерному різанні металів мають багато схожих характеристик із іншими термічними способами різання. Характеристики отриманого різки визначають наступні показники: точність, нерівність різки R_z , неперпендикулярність

(клиновидність) j , протяжність зони термічного впливу $b_{зтв}$, ширина верхнього різку $b_в$, ширина нижнього різку $b_н$, кількість ґрату (напливи на нижній кромці матеріалу обробки) [5].

У процесі різання металів неперервним випромінюванням лазера виділяють стаціонарний та нестаціонарний характер руйнування матеріалу. Значення швидкості руйнування залежить v_p залежить від фізико-хімічних властивостей металів. Увесь діапазон швидкостей лазерного різання металів неперервним випромінюванням можна представити у вигляді:

- першої області режимів зі швидкістю $0,5 \leq v < v_p$ (швидкість руйнування більше за швидкість різання), що відповідає нестаціонарному механізму руйнування;
- другої $v > v_p$ (швидкість руйнування менша за швидкість різання), відповідає стаціонарному механізму руйнування;
- третій – $v < 0.5$ м/хв., автогенний режим.

Нестаціонарний режим встановлюється, якщо швидкість різання менше оптимальної (див. табл. 1). Цей режим не є бажаним і у процесі різання його намагаються уникати, оскільки на кромці з'являється значна кість ґрату та погіршується якість обробки. Стаціонарний механізм руйнування матеріалу встановлюється за оптимальної та більш високої швидкості різання (10-15 м/хв). Руйнування матеріалу проходить у неперервному режимі, а температурне поле навколо лазерного променя, що рухається, постійне. У даному випадку різ буде рівним і якісним.

Таблиця 1

Показники якості різання вуглецевих сталей

Товщина, мм	Оптимальна швидкість різання, м/хв.	Середня ширина різку, мм	Шорсткість, мкм
1	6 – 7,02	0,1 – 0,15	10 – 15
2	4,5 – 4,98	0,2 – 0,25	20 – 25
3	3,48 – 4,02	0,3 – 0,35	30 – 35

Діапазон швидкостей різання для сталевих листів, за яких ще зберігаються борозни на поверхні різів, знаходиться у межах від 0,6 м/хв. до нижньої межі значень оптимальної швидкості. При більш низьких швидкостях переміщення променя $v < 0,5$

м/хв. метал горить по всій поверхні контакту із газовим струменем, за рахунок екзотермічної реакції окислення. Через це різ виходить дуже збільшеним за розміром по ширині і стає «рваним». Таким чином при впливі лазерного різання на метали можливі два механізми різання – плавлення та випаровування. Практичне використання різання металів за рахунок лише одного механізму плавлення ускладнене через високі енергозатрати. Зниження цих затрат досягається використанням допоміжного газу для видалення продуктів руйнування металу з каналу різання.

Процес лазерного різання металів та інших матеріалів значно прискорюється при обдуванні матеріалу киснем. У цьому випадку більша частина енергії, що витрачається на різання, отримується за рахунок екзотермічних реакцій між металом та киснем. Вказаний процес дозволяє різати з високою швидкістю металеві пластини великої товщини. За присутності кисневого струменя швидкість різання зростає на 40%.

Мінімальний тиск газу, при перевищенні якого глибина різі не зростає, може бути оцінене з виразу:

$$\Delta p_{\min} = \frac{1}{2} \frac{P^2 v^2}{p^2 p(c\alpha)^2 \left(T_{nl} + \frac{H_{nl}}{n} \right)} \quad (1)$$

де P – сумарна потужність поглиненого лазерного випромінювання та екзотермічної реакції окиснення;

b – ширина різі;

n – швидкість переміщення променю;

$h = a_{ef} * h_m$ – ефект процесу лазерного різання (h_m – термічний к.к.д., що показує відношення енергії, витраченої на виплавлення зразка, до повної енергії, поглиненої розплавом);

H_{nl} – скрита теплота плавлення;

c – питома теплоємність матеріалу;

a – коефіцієнт теплопровідності, густина матеріалу;

p – температура плавлення.

Підвищуючи тиск та швидкість газу, можна не боятися зниження ефективності процесу різання через охолодження металу. Підвищення тиску кисню до значення 0,3-0,4 МПа веде до пропорційного збільшення глибини різання вуглецевої сталі. При подальшому збільшенні тиску глибина різі стабілізується, а потім дещо зменшується (1) [4].

Розглянемо декілька факторів, що впливають на якість різання.

1. Допоміжні гази, що подаються до зони різання
 - O_2 для різання вуглецевої сталі;
 - N_2 для нержавіючої сталі та алюмінієвих сплавів;
 - стиснене повітря для різання картону, фанери та інших неметалевих матеріалів.
2. Витрата допоміжного газу залежить від:
 - діаметра вихідного отвору сопла;
 - тиску допоміжного газу;
 - швидкості різання, що визначається товщиною матеріалу і потужністю лазера.
3. Сопло та його центрування. При ідеальному центруванні вихідного отвору сопла, якість різання буде максимально хорошою.
4. Вплив положення фокусу на якість різання. Ми повинні визначити правила відліку положення фокусу (рис. 1).

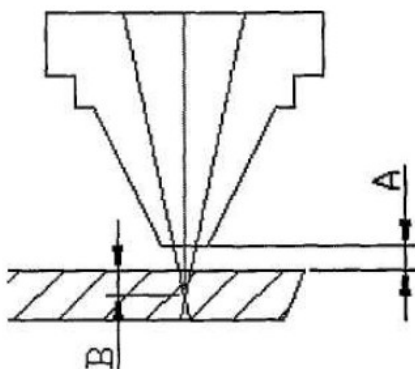


Рис. 1. Положення фокусу відносно верхньої площини листа

Зазвичай сопло утримується за допомогою ємнісного датчика на відстані A від верхньої площини листа обробки. При цьому положення фокусу відраховується від верхньої кромки листа, як відстань B : із знаком $+$, якщо фокус розташований вище кромки, і зі знаком мінус, якщо нижче кромки (на рис.1 положення фокусу від'ємне). Лазерне різання можливе за рахунок фокусування лазерного випромінювання у пляму малого діаметра та створення густини потужності випромінювання достатньої для плавлення та випаровування матеріалу за рахунок практично миттєвого досягнення точки кипіння практично усіх матеріалів [3].

Результати досліджень

На високих швидкостях і прискореннях переміщення ріжучої головки лазера критичним є дотримання стабільної фокусної відстані відносно поверхні листа, що

розкрююється. Особливо це важливо для тонких листів, 0,5-1 мм, які після розмотки не проходять стадію випрямлення. Та поява волоконних лазерів робить задачу контролю висоти ще більш актуальною, оскільки стали можливими великі швидкості переміщення ріжучої голови, майже моментальне вирізання малих деталей завдяки додатковому використуванню 2-координатних лінійних двигунів та додатковим задачам, які покладаються на системи лазерної різки (наприклад, маркування).

У промисловості для вимірювання відстані до об'єктів використовують, так звані «датчики відстані». В устаткуванні лазерного різання знайшли використання, в основному, ємнісні датчики, оскільки вони мають найбільшу швидкість вимірювання і відносно простий спосіб інтеграції у ріжучу головку лазера.

Принцип дії ємнісних датчиків заснований на тому, що ємність прямо пропорційна діелектричній проникливості ізолятора. У нашому випадку ізолятором є повітря. У якості обкладок виступають мідна пластина, що встановлюється на ріжучій головці, та лист металу. Чим ближче пластина до листа металу, тим більша ємність. Застосування ємнісних безконтактних датчиків обмежено тим, що вони працюють на малих відстанях, до 40 мм. Робоча висота вісі переміщення ріжучої головки лазера складає в цілому 100-150 мм. У зв'язку із цим, пристрій контролю висоти також повинен вирішувати питання позиціонування головки у так званій «мертвій зоні», шляхом контролю не лише за показниками датчика, але й за показниками енкодера вісі і кінцевих датчиків.

Проте одна із основних проблем ємнісних датчиків, а саме залежність від зовнішніх факторів і завадоне захищеність, накладає обмеження на подальше зростання швидкості вимірювань.

Ємнісні датчики мають високу точність та досить низьку вартість. Але розробники, що вирішили використовувати ємнісні датчики в своїй конструкції, змушені передбачити спочатку перетворення ємності у напругу, а потім перетворення цієї напруги у цифровий сигнал за допомогою прецизійного АЦП. Складність конструкції, затрати часу на розробку прототипу і тестування системи найчастіше змушують розробників використовувати інші типи датчиків. В результаті система може виявитися більш дорогою, менш точною, або і те і інше водночас.

Хоча ємнісні датчики часто використовуються в різноманітних пристроях, існує багато варіантів їх підключення, пов'язаних з певними проблемами з точки зору схем формування сигналу. Однак існує новий підхід – перетворення ємності в код за

допомогою сігма-дельта модулятора, який зазвичай являє собою частину АЦП. Сігма-дельта модулятор може працювати в якості способу прямого перетворення ємності у цифровий код.

Добре відпрацьована технологія сігма-дельта перетворення вже багато років використовується в АЦП з високою роздільною здатністю. На рис. 2 спрощено показана архітектура стандартного промислового сігма-дельта АЦП. Конденсатори C_{IN} та C_{REF} періодично переключаються між входом сигналу та джерелом опорної напруги V_{IN} та V_{REF} , і вони «накачують» заряд інтегратора C_{INT} .

Компаратор контролює рівень сигналу на виході з інтегратора та керує фазою перемикання вхідного ключа, замикаючи петлю зворотного зв'язку і таким чином компенсуючи заряди, що протікають через сигнальне (V_{IN}) та опорне (V_{REF}) коло.

Однобітний потік нулів та одиниць, що показаний на рис. 2 на виході компаратора, змінюється у відповідності з величиною заряду, що необхідний для балансування кола. Цей заряд пропорційний до напруги та ємності. Так як ємність конденсатора у АЦП має фіксовану величину, густина одиниць у однобітовому потоці відповідає співвідношенню напруг на сигнальному вході (V_{IN}) та на вході опорної напруги (V_{REF}). Після цього цифровий фільтр опрацьовує цей однобітний потік даних і формує результат перетворення у цифровому вигляді [1].

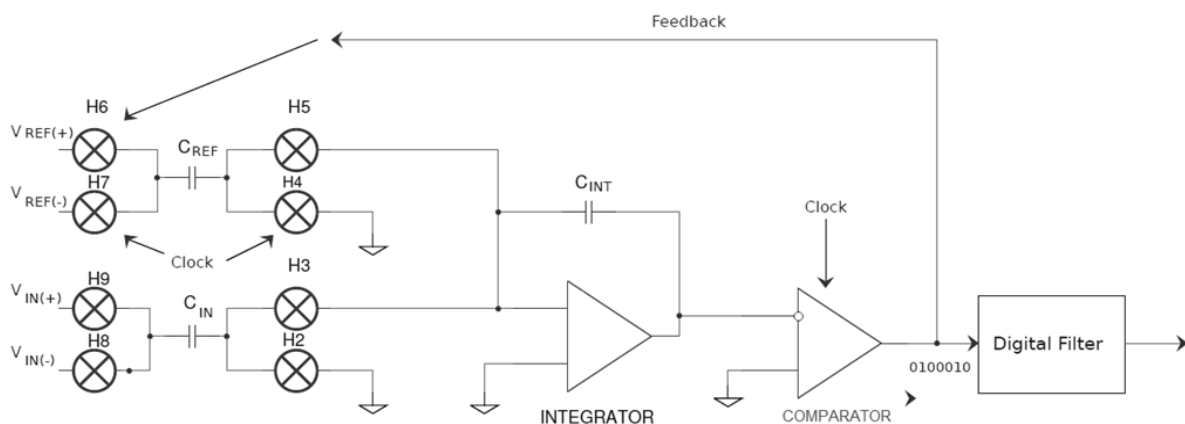


Рис. 2. Спрощена структурна схем сігма-дельта АЦП

Така архітектура за своєю суттю є надфективною з точки зору лінійності і точності, але особливістю даної архітектури є балансування між розділовою здатністю і швидкодією (частотою оновлення даних на виході). Якщо цифровий фільтр накопичує більше однобітних даних, це потребує більше часу на обробку, але забезпечує у результаті більше розрядів «без тремтіння». Розділова здатність обмежена тільки

шумом системи. Частота оновлення даних на виході обмежена максимальною тактовою частотою, яка відповідає швидкості спрацьовування електронних ключів, полосі частот інтегратора та швидкодії компаратора.

Висновки

Отже, як висновок з цієї роботи, можна сказати, що необхідне подальше дослідження методу контролю висоти, що заснований на високошвидкісних вимірюваннях ємності за допомогою сігма-дельта АЦП. Це дозволить підвищити якість різання і знизити собівартість подальшої обробки тонколистових металів. Також даний метод має відкрити можливість для подальшого збільшення швидкостей переміщення ріжучої голови при обробці тонкого металопрокату. Важливим ще є те, що вдосконалення цього методу, дозволить виготовляти більш якісні деталі, що позитивно відобразиться на економічному стані підприємств.

Список використаних джерел

1. Guo, J. Analysis of a segmented annular coplanar capacitive tilt sensor with increased sensitivity / J. Guo, P. Hu, J. Tan. – Sensors. – 2016. – 133 p.
2. Kramar, D. Laser and Abrasive Waterjet Cutting Economics. International Sheet Metal Review / D. Kramar, M. Junkar. – 2000. – № 2. – pp. 38-41.
3. Звелто О. Принципы лазеров. / Орацио Звелто; [пер. под науч. ред. Т. Шмаонова]. – 4-е изд. – СПб. : Издательство «Лань», 2008. – 720 с.
4. Кокорин В. Н. Моделирование процесса контурной лазерной резки с механической активацией листового металопроката / В. Н. Кокорин, Н. И. Шанченко, О. В. Мищенко // Уточняющие технологии покрытия. – 2015. – №11. – С. 4-49.
5. Панченко В. Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. Я. Панченко, В. С. Голубев. – М : Физматлит. – 2009. – 664 с.
6. Пилипенко Ю. М. Рекурсивні функції у задачах апроксимації

References

1. Guo, J. (2016). Analysis of a segmented annular coplanar capacitive tilt sensor with increased sensitivity / J. Guo, P. Hu, J. Tan. – Sensors. – 133 p.
2. Kramar, D. Laser and Abrasive Waterjet Cutting Economics. International Sheet Metal Review / D. Kramar, M. Junkar. – 2000. – № 2. – pp. 38-41.
3. Zvelto, O. (2008). *Printsiipy lazerov*. [Principles of lasers]; [per. pod nauch. red. T. Shmaonova]. – Vol. No.4. – SPb. : Izdatelstvo «Lan». – 2008. – 720 p. [in Russian].
4. Kokorin, V. N. *Modelirovaniye protsessa konturnoy lazernoy rezki s mekhanicheskoy aktivatsiyey listovogo metalloprokata* [Modeling of the process of contour laser cutting with the mechanical activation of the metal sheet] – Vol. No.11 – 2015. – pp. 4-49. [in Russian].
5. Panchenko, V.Ya. & Golubev V.S. (2009). *Lazernyye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamentalnykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied developments] – M : Fizmatlit. – 2009. – 664 p. [in Russian].
6. Pylypenko, Yu.M. *Rekursyivni funktsii u*

значень багатовимірних таблиць / Ю.
М. Пилипенко. – Вісник КНУТД. –
Київ. – №6 (62). – 2011. – с.42-47.

*zadachakh aproksymatsii znachen
bahatovymirnykh tablyts* [Recursive
functions in problems of approximation of
values of multidimensional tables] – Visnyk
KNUTD. – Kyiv. – No.6 (62). – 2011. –
p.42-47. [in Ukrainian].

**Улучшение метода контроля высоты в системах лазерной резки металлов
Власенко А. И., Пилипенко Ю. Н.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Рассмотреть возможность внедрения устройства контроля высоты, которое использует емкостной датчик на базе сигма-дельта АЦП.

Методика. В работе использованы методы системного анализа, математического и аналитического моделирования.

Результаты. Исследованы факторы, которые влияют на работу станков лазерной резки металлов и определен способ, как с незначительными затратами улучшить эффективность процесса лазерной резки металлов. Исследована возможность использования емкостных датчиков на базе сигма-дельта АЦП для улучшения показателей процесса лазерной резки металлов.

Научная новизна. Использование емкостного датчика для измерения зазора в станках лазерной резки с использованием сигма-дельта АЦП.

Практическая значимость. Увеличение скорости изготовления деталей и улучшение их качества.

Ключевые слова: емкостной датчик, система лазерной резки металлов, контроль высоты, слежение, сигма-дельта АЦП

Improvement of method of high control in systems of the laser metals cutting

Vlasenko A., Pylypenko Yu.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Consider the possibility of introducing a height control device that uses a capacitive sensor based on a sigma-delta ADC.

Methodology. The methods of system analysis, mathematical and analytical modeling are used in the work.

Findings. Factors that affect the operation of laser cutting machines for metals have been investigated and a method has been determined how to improve the efficiency of the laser cutting process of metals with little cost. The possibility of using capacitive sensors based on the sigma-delta ADC for improving the parameters of the laser cutting of metals has been investigated.

Originality. Using a capacitive sensor to measure the gap in laser cutting machines using a sigma-delta ADC.

Practical value. Increasing the speed of manufacturing parts and improving their quality.

Keywords: capacitive sensor, laser cutting system for metals, height control, tracking, sigma-delta ADC