

УДК 621.3: 656.61: 004.451.83

Зайцев Євген Олександрович

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу №5
Інститут електродинаміки НАН України, Київ

Криворучко Олена Володимирівна

Доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри програмної інженерії та інформаційних систем
Національний торговельно-економічний університет, Київ

Сидорчук Володимир Євгенович

Кандидат технічних наук, старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних систем
Національний торговельно-економічний університет, Київ

Цюцюра Микола Ігорович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, orcid.org/0000-0003-4713-7568
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ МЕТАЛУРГІЙНОГО
ОБЛАДНАННЯ НА БАЗІ ЛАЗЕРНИХ ПРОФІЛОМЕТРІВ**

***Анотація.** У даній статті розглянуто проблему діагностики футерівки плавильних печей в металургійній промисловості з метою зменшення енергоспоживання енергоємних виробництв в Україні. Показано, що найбільш придатним – переважним способом визначення стану футерівки є безконтактні методи, засновані на використанні лазерних профілометрів. Вимоги до використовуваної футерівки конвертерів поєднують в собі необхідність досягнення її високої стійкості, яка підвищується при застосуванні системного підходу під час вибору конструкції футерівки, шляхом прогнозування зношення різних її зон. Моніторинг ступеня зношення футерівки дозволяє приймати своєчасні рішення щодо проведення ремонту обладнання та підвищення енергоефективності виробництва. Розроблення моніторингових систем є актуальною науковою задачею, яка виникає у зв'язку з необхідністю впровадження в Україні високоточних і швидкодіючих автоматизованих систем. Найбільш перспективним для побудови систем моніторингу є безконтактні методи, засновані на використанні лазерних профілометрів. Запропоновано структурну схему комп'ютеризованої безконтактної моніторингової системи на основі фазового лазерного вимірювача, здатного працювати від дифузійно-відбиваючої поверхні.*

***Ключові слова:** енергоспоживання; безконтактний метод; лазерний профілометр; фаза; комп'ютеризована моніторингова система; LabView; футерівка; металургійне обладнання*

Вступ

На сьогодні ефективне управління енергоресурсами з використанням автоматизованих технологій, спрямованих на підвищення енергоефективності, та впровадження енергозберігаючих технологій у сфері енергоємних виробництв дозволяє зменшити собівартість виробленої продукції. Однією із таких галузей є металургійна промисловість, де велика частина спожитої електроенергії припадає на моменти запуску процесу виробництва після вимушеної зупинки. Однією з причин такої зупинки може бути зношення футерівки металургійного обладнання. Зношення футерівки виникає насамперед через роботу металургійного обладнання в складних умовах, які викликані такими чинниками:

- впливом на матеріали високої температури розплавленого металу;
- термічними напруженнями, які виникають в матеріалах при зміні температури футерівки печі;
- ударами частинок шихти при завантаженні;
- навантаженнями, які виникають при обертанні конвертора під час процесу плавлення металу.

Вплив наведених чинників на металургійне обладнання призводить до його руйнації (найчастіше шляхом утворення тріщин або локальних сколів) та подальшого вимивання розплавом металу захисного покриття (футерівки), що призводить до зупинки металургійного обладнання.

Наявність моніторингу ступеня зношення футерівки зменшує імовірність ситуацій, пов'язаних

із зупинкою обладнання на ремонт і дозволяє підвищити енергоефективність виробництва. Актуальність розробки моніторингових систем виникає у зв'язку з тим, що в Україні високоточні і швидкодіючі моніторингові системи серійно не випускаються, хоча потреба в них є, а використання зарубіжних зразків техніки аналогічного призначення вимагає значних фінансових витрат, тому що вартість відомих приладів сягає від 1,5 тис. до півмільйона євро (системи Ferrotron-Tech). Крім того, актуальність підвищення рівня енергоефективності в усіх галузях економіки визначено Президентом України та Урядом України як пріоритетні напрямки забезпечення енергетичної безпеки нашої країни [1].

Мета статті

Метою роботи є створення основ для проектування, розрахунку, експериментальних досліджень систем моніторингу металургійного обладнання (стану футерівки) на основі досвіду авторів з розробки й реалізації лазерних профілометрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розгляду питань побудови безконтактних систем безперервного моніторингу металургійного обладнання приділяється важливе місце в публікаціях закордонних і вітчизняних дослідників. В них розглядаються окремі аспекти розробки та реалізації діагностичних та моніторингових систем, приділяється увага розробкам кутомірних та кутоповертаючих механізмів, а також методам контролю футерівки металургійного обладнання. Серед описаних систем моніторингу найбільшого поширення набули системи побудовані на таких методах контролю:

– метод візуального контролю стану футерівки плавильної печі, який на сьогодні є, з одного боку основним, а з іншого – самим неточним, оскільки точність визначення фактичного технічного стану низька і залежить від кваліфікації та досвіду роботи персоналу;

– метод контролю на основі визначення зміни значення струму, який обумовлений зміною опору футерівки плавильної печі, і полягає у вимірюванні електричного опору між індуктором і розплавленим металом та індуктором і заземлювальним електродом індукційної плавильної печі, який має контакт з розплавленим металом. Метод є технічно складним в реалізації;

– метод контролю зміни теплового потоку через футерівку плавильної печі;

– метод безконтактного контролю форми футерівки металургійного обладнання, який базується на вимірюванні відстані до футерівки доменних печей за допомогою лазерних профілометрів (ЛП) і подальшого формування графічного зображення футерівки для аналізу її поточного стану. Складність методу полягає в тому, що потрібно вимірювати відстань до дифузно-відбиваючих об'єктів, які нагріті до високої температури.

Питанням розробки оптимальних моніторингових систем для вирішення завдань безперервного контролю за станом футерівки значна увага приділяється в роботах [2 – 4]. Так, в роботі [4] розглядається лише побудова інформаційної частини системи моніторингу. У роботі [3] розглянута побудова безконтактної системи на базі промислової інфрачервоної відеокамери, недоліком якої є мала здатність розрізнявати об'єкти з однаковою температурою, в [1] розглядається система, яка включає в себе спеціальні термосенсори, які встановлюються по довжині блоків при заміні футерівки доменної печі.

Більшість використовуваних сьогодні методів мають істотні недоліки, серед яких можна відзначити такі: неповнота поданої моніторингової інформації, що обумовлена високою похибкою вимірювання, та, як правило, при прийнятній точності і швидкодії постає висока вартість обладнання та його монтажу.

Вирішення проблеми

Вимоги до використовуваної футерівки конвертерів поєднують в собі необхідність досягнення її високої стійкості при мінімізації питомих витрат на вогнетривкі матеріали, а також можливість прогнозування швидкості зношування захисної футерівки. Системний підхід у виборі конструкції футерівки забезпечує підвищення її стійкості. Він полягає у постійному вдосконаленні проектів з прогнозування зносу різних зон футерівки конвертора в сукупності із застосуванням нових вогнетривких матеріалів.

Вирішення завдання моніторингу зносу футерівки за допомогою традиційних контактних методів не призводить до бажаного результату, оскільки контрольований об'єкт має дуже високу температуру (близько 1600°C) [5] та потребує, у більшості випадків, зупинки металургійного обладнання для проведення модернізації. Найперспективнішими для побудови систем моніторингу є безконтактні методи, засновані на використанні лазерних профілометрів. У випадку застосування лазерних профілометрів немає потреби у зупинці металургійного обладнання на модернізацію, а також такі моніторингові системи

є мобільними і можуть використовуватись для контролю декількох різних типів обладнання.

Розробка вітчизняних безконтактних моніторингових систем (БМС) на основі лазерних профілометрів і принципів їх роботи є актуальним науково-прикладним завданням у металургійній промисловості України. Особливістю роботи систем БМС є робота в діапазоні відстаней від 2 до 15 м, причому нижня межа визначається технікою безпеки при роботі з об'єктами, що мають високу температуру [5]. При цьому БМС здійснює контроль форми внутрішньої поверхні конвертерів доменних печей (футерівки) без зупинки технологічного процесу. За таких вимірювань виникає завдання вимірювання відстані до нагрітих дифузно-відображаючих об'єктів і на основі отриманих даних формування 3D-моделі [5]. Причому похибка вимірювання однієї точки має становити не більше 10 мм, що, в свою чергу, обумовлено мінімально допустимою товщиною захисного шару – футерівки.

Одними з найбільш точних профілометрів, які здатні працювати від дифузно-відбиваючих поверхонь [5], є фазові профілометри. У свою чергу, за практичної реалізації швидкодіючих і завадостійких вимірювачів фазового зсуву для лазерних далекомірних систем, як показано в [6], ефективним є застосування алгоритму оптимального фазометра, заснованого на використанні дискретного перетворення Гільберта [7]. У цьому випадку значення фазового зсуву визначається за формулою:

$$\varphi = \arctg \left(k \cdot \frac{\sum_{n=1}^M (U_n(t) \cdot U_m \sin(\omega n t_D))}{\sum_{n=1}^M (U_n(t) \cdot U_m \cos(\omega n t_D))} \right), \quad (1)$$

де $U_n(t)$ – вибірки відбитого зондувального сигналу; $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота сигналу $U(t)$; U_m – амплітудні значення ортогональних складових зондувального сигналу; $U_m \sin(\omega t)$ і $U_m \cos(\omega t)$ – опорні складові, які використовуються при ортогональній обробці; n – поточний номер вибірки; M – загальна кількість вибірок; t_D – період дискретизації зондувального сигналу.

При цьому відстань L до об'єкта визначається:

$$L = \varphi_k \cdot \lambda_3 / 2\pi,$$

Де λ_3 – довжина хвилі лазерного випромінювання.

Схема на основі комп'ютеризованого ЛП, що розроблена з урахуванням вже згаданих вимог до БМС, представлена на рис. 1.

Запропонована схема комп'ютеризованої системи моніторингу футерівки (рис. 1) складається

із: лазерного сенсора, блоку дискретизації сигналу, порту вводу-виводу і персонального комп'ютера (ПК). ПК є центральним пристроєм системи моніторингу ступеня зносу футерівки, на яку покладені такі функції:

- формування поточної конфігурації системи моніторингу (вибір точки вимірювання через керування кроковими двигунами координатної системи);
- вибір режиму роботи далекомірної системи;
- узгодження роботи аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і оперативно-запам'ятовуючого пристрою (ОЗП) за допомогою блоку управління (БУ);
- обробка, накопичення та видача результатів моніторингу та видача діагностичної інформації користувачеві.

В якості лазерного сенсора в БМС використовується оптичний приймально-передавальний пристрій, що складається з напівпровідникового лазерного випромінювача (НЛВ) з довжиною оптичної хвилі 0,85 мкм, відповідного лазера лавинного фотоприймача (ФП), блоку змішувачів і керованого блоку синтезаторів частоти (БСЧ), що призначений для генерування частоти модуляції ПЛВ і формування сигналу опорної напруги. Управління БСЧ виконується за допомогою блоку управління. Для забезпечення роботи БМС використовуються спеціалізовані програмно-математичні засоби (ПМЗ), алгоритм роботи, яких узгоджений з технологічним режимом роботи металургійного обладнання при моніторингу стану футерівки ПМЗ, та призначений для:

- взаємодії пристрою збирання даних, елементів лазерного сенсора і ПК;
- організації інформаційних потоків в системі;
- реалізації алгоритмів обробки даних на основі дискретного ПП;
- відображення елементів управління і діагностичної інформації, які виконані в системі графічного програмування LabVIEW.

Виходячи з технологічних вимог до БМС, авторами був розроблений алгоритм роботи БМС. Комплекс юстується щодо печі за визначеними опорними точками. Для цього на печах виробником, відповідно до норм, зроблені три опорні точки А, В і С, які знаходяться на зовнішній поверхні печі (рис. 2). Налаштувавшись на опорні точки, система знаходить центральну вісь печі і враховує її типорозмір. Далі відбувається сканування внутрішньої поверхні відносно центральної осі печі по вертикальних поверхнях. Результати сканування використовуються спеціалізованими програмно-математичними засобами для подальшої діагностики печі.

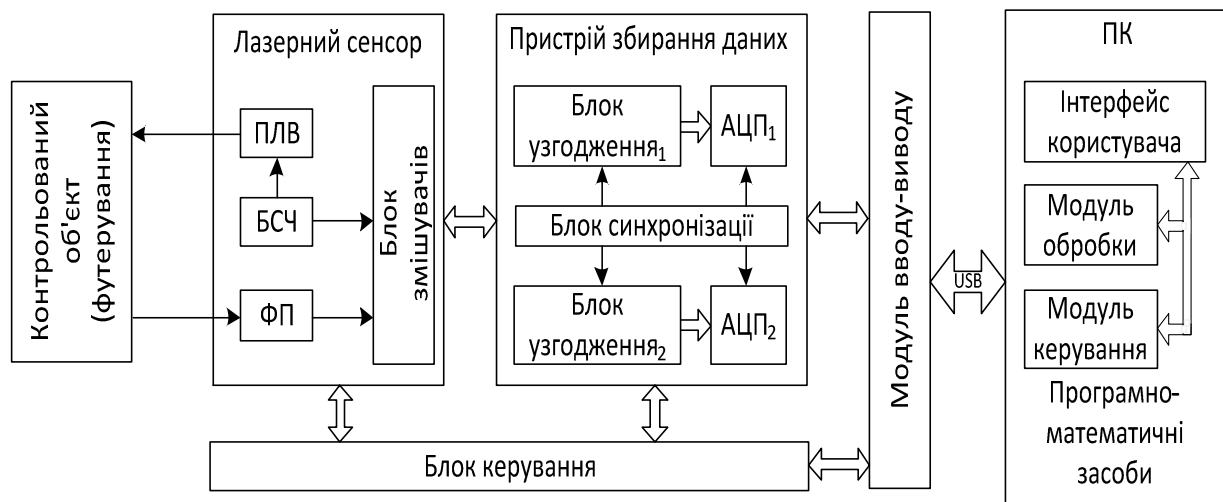


Рисунок 1 – Лазерна система моніторингу футерівки

При подальшому використанні системи для діагностики печі її необхідно налаштувати хоча б на одну з трьох опорних точок. Таке налаштування найчастіше проводять на точку С, оскільки інші точки покриті шлаком, що пов'язано з технологічними особливостями виплавлення сталі. У такому випадку процес діагностики починається з короткого калібрування по опорній точці з урахуванням типорозміру печі. Після калібрування БМС починає "сканувати" внутрішню поверхню печі. Дана операція відбувається таким чином: координатно-задаюча система встановлює далекомірну частину механізму в першу точку, в якій відбувається вимірювання, після чого вимірюються послідовно інші точки, при цьому координатно-задаюча система переміщує далекомірну частину таким чином, щоб відбувалося сканування всієї поверхні печі. Сканування внутрішньої поверхні проходить відносно центральної осі печі по вертикальних поверхнях.

Результати сканування кожного шару використовуються для визначення місць прогорання футерівки. Порівняння результатів здійснюється по вимірних опорних точках, які щоразу вимірюються у визначених секторах, що дозволяє спростити пошук дефектного місця і за необхідності провести регламентні ремонтні роботи з відновлення футерівки. Також на підставі вимірювань контрольних точок в секторах, може бути побудоване пошарове або секторальне графічне представлення внутрішньої поверхні футерівки печі.

За даними моніторингу системою БМС виконується і діагностика, за результатами якої можна реєструвати не тільки ступінь зношення футерівки, а й здійснювати прогноз про часовий інтервал регламентних робіт з відновлення або заміни футерівки.

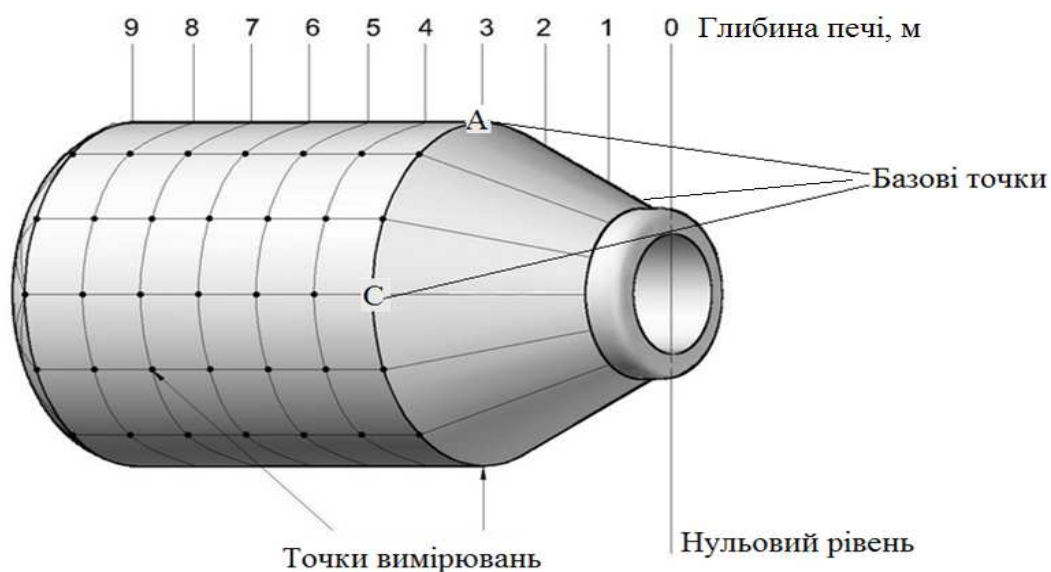


Рисунок 2 – Розбивка поверхні сканування печі на сектори

Така діагностика дозволяє раціонально використовувати футерівки і в результаті зменшити кількість зупинок обладнання на ремонтні роботи, відповідно, зменшити собівартість виробленого металу.

Висновки

На основі аналізу наявної номенклатури методів та засобів моніторингу стану металургійного обладнання в статті показано

перспективність використання фазових лазерних систем вимірювання відстані для діагностики внутрішньої поверхні конверторів печей. Таким чином, розробка сучасних засобів моніторингу на основі оптоелектронних засобів призначених для діагностики металургійного обладнання (футерівки доменних печей) є актуальним завданням, вирішення якого дозволяє підвищити енергоефективність металургійного виробництва.

Список літератури

1. Закон України «Про енергозбереження». – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>.
2. Mobley R. K. *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Science, 2002, – 459 p.
3. ООО «ЭНЕРГО АВАНГАРД» – Режим доступу: <http://www.eavangard.ru/rus/production/dometayapech.htm>
4. Информационные системы в металлургии: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / Н.А.Спирин, В.В.Лавров. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2004. – 495 с. <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/51/1/ism.pdf>
5. Бранигец И.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Исследование фазовых лазерных измерителей расстояния до нагретых объектов//Техническая электродинамика. – К.: 2005. №2(11) – С. 114-117.
6. Ландсберг Г.С. *Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот.* – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 848 с.
7. Зайцев Е.А. Цифровая регистрация сигналов лазерных дальномеров на промежуточной частоте // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* – 2014. – № 3 – С. 48 – 52.

Стаття надійшла до редколегії 23.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Д. Бушуев, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Зайцев Евгений Александрович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела №5
Институт электродинамики НАН Украины, Киев

Криворучко Елена Владимировна

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии и информационных систем
Национальный торгово-экономический университет, Киев

Сидорчук Владимир Евгеньевич

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры программной инженерии и информационных систем
Национальный торгово-экономический университет, Киев

Цюцюра Николай Игоревич

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, orcid.org/0000-0003-4713-7568
Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРОФИЛОМЕТРОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема диагностики футеровки плавильных печей в металлургической промышленности с целью уменьшения энергопотребления энергоемких производств в Украине. Показано, что наиболее подходящим – преимущественным способом определения состояния футеровки являются бесконтактные методы, основанные на использовании лазерных профилометров. Требования к используемой футеровки конвертеров сочетают в себе необходимость достижения ее высокой устойчивости, которая повышается ее зон. Мониторинг степени изношенности футеровки позволяет принимать своевременные решения о проведении ремонта оборудования и повышения энергоэффективности производства. Предложена структурная схема компьютеризированной бесконтактной мониторинговой системы на основе фазового лазерного измерителя, способного работать от диффузионно-отражающей поверхности.

Ключевые слова: энергопотребление; бесконтактный метод; лазерный профилометр; фаза; компьютеризированная мониторинговая система; LabView; футеровка; металлургическое оборудование

Zaytsev Evgen Oleksandrovych

Ph.D., senior fellow №5

*Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv***Kryvoruchko Olena Volodymirivna**

PhD, Associate Professor, Head of Software Engineering and Information Systems

*National Trade and Economic University, Kyiv***Sydorchuk Volodymir Evgenovich.**

Ph.D., senior lecturer in software engineering and information systems

*National Trade and Economic University, Kyiv***Tsiutsiura Mikola Igorovich**Ph.D., Associate Professor, Department of Information Technology, orcid.org/0000-0003-4713-7568*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev***BASES OF METALLURGICAL MONITORING SYSTEMS EQUIPMENT BASED ON LASER PROFILERS**

Abstract. In this article is discussed the problem of diagnosis of lining melting furnaces in the steel industry to reduce energy consumption of energy-intensive industries in Ukraine. It is shown that the most appropriate – a primary way to determine the condition of the lining is a non-contact methods based on the use of Laser Profilers. Requirements lining used converters combine the need for its high resistance which increases with a systematic approach when choosing lining design by predicting the wear of its various areas. Monitoring the degree of deterioration of the lining allows you to take timely decision on the repair of equipment and increase production efficiency. The development of monitoring systems is an actual scientific problem which arises in connection with the necessity of introduction in Ukraine of high-precision and high-speed automated systems. Proposed noncontact block diagram of a computerized monitoring system based on the phase of the laser measuring device that can run on diffusion-reflecting surface.

Keywords: energy; noncontact method; laser profilometer; phase; computerized monitoring system; LabView; lining; metallurgical equipment

References

1. Law of Ukraine "On energy saving". – Access: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>.
2. 2 Mobley, R.K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Science, 459.
3. 3 LLC "Energo Avangard" – Access: <http://www.eavangard.ru/rus/production/domennayapech.htm>
4. 4 Spyryn, N.A. & Lavrov V.V. (2004). *Clearing system in Metallurgy: Lecture notes (Separate Heads IZ textbook for high schools)*. Ekaterinburg: Ural national technical University, 495. <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/51/1/ism.pdf>
5. Braginetz, I.A., Kononenko, A.S., Makarenko, Y.A., Nizhensky, A.D. (2005). *Study of phase laser distance meters heated objects. Technical electrodynamics*. Kyiv, Ukraine: 2(11), 114-117.
6. Landsberg, G.S. (2003). *Optics. Proc. Benefit: For universities*. – 6 th ed., Stereotypes. – M. : FIZMATLIT, 848.
7. Zaitsev, E.A. (2014). *Digital recording of signals of laser range finders at the intermediate frequency. Measuring and computing in technological processes*, 3,48- 52.

Посилання на публікацію

- APA Zaytsev Evgen, Kryvoruchko Olena, Sydorchuk Volodymir, Tsiutsiura Mikola (2015). *Bases of metallurgical monitoring systems equipment based on laser profilers*. *Management of Development of Complex Systems*, 24, 177 – 182.
- ГОСТ Зайцев Є.О. Основи побудови систем моніторингу металургійного обладнання на базі лазерних профілометрів [Текст] / Є.О. Зайцев, О.В. Криворучко, В.Є. Сидорчук, М.І. Цюцюра // *Управління розвитком складних систем*. – 2015. – № 24. – С. 177 – 182.