

Наукові засади корозії мікро- і нано-структурованих матеріалів в електрохімічних системах сенсорів і суперконденсаторів

Научные основы коррозии микро- и наноструктурированных материалов в электрохимических системах сенсоров и суперконденсаторов

Scientific foundations of corrosion of micro- and nanostructured materials in electrochemical systems, sensors and supercapacitors

1. **Номер державної реєстрації теми – 0113U001595**, номер реєстрації в університеті – **2614-ф**
2. **Науковий керівник**- д.т.н., проф. Герасименко Ю.С., Герасименко Ю.С., Gerasymenko Yuriy S. д.т.н., проф. Лінючева О.В., Линючева О.В., Linyucheva Olga V.
3. **Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

Створено наукові засади корозії мікро- і нано-структурованих матеріалів в електрохімічних системах сенсорів і суперконденсаторів, що базуються на новій класифікації корозійних процесів. Наукова новизна створених засад полягає у експериментальному виявленні і теоретичному обґрунтуванні вирішальної ролі корозійних процесів на кінетику електродних процесів при граничних режимах експлуатації названих систем. Показано, що існуюча десятибальна шкала швидкості корозії, за якою наразі розглядається лише корозія швидше 0.001 мм/рік, не придатна для класифікації корозійних процесів в електрохімічних системах сенсорів і суперконденсаторів. Доведено науково-технічну доцільність врахування корозії мікро- і нано-структурованих електродних матеріалів повільніше 0,001 мм/рік, оскільки вона визначає формування як фонових (шумових) сигналів і саморозряду, так і аналітичних та силових струмів цільової експлуатації електрохімічних систем.

Введено нове поняття – “надповільна корозія”, – комплекс процесів на основі окислення електродного матеріалу з умовним глибинним показником швидкості менше 0,001 мм/рік, з урахуванням якого проведена класифікація подібних та відмінних особливостей названих систем та розроблено оригінальні методики досліджень. Теоретично доведено і підтверджено експериментально, що підтримання кінетичних параметрів електродних процесів у відкритій електрохімічній комірці на стабільному рівні забезпечується перебігом надповільної корозії в умовах, за яких вирішується протиріччя між ростом гідрофілізації електродів та зростанням контактного та інших опорів при нагромадженні продуктів окиснення та деструкції електродного матеріалу. Вперше виявлено надповільні (з періодом більше тижня) зміни параметрів електрохімічних систем, при тому, що до сьогодні за цими параметрами визнавали лише дрейф з постійним трендом та частоти стохастичних теплових коливань більше кількох кГц (для електрохімічних шумів), а повільні коливання лишали поза увагою, безпідставно списуючи їх на природні циклічні зміни умов ведення експериментів та експлуатації.

Встановлено механізм формування основних кінетичних характеристик процесів у відкритих електрохімічних системах (коефіцієнт перетворення, фоновий струм), які відповідають стаціонарним умовам за визначенням, але у значній мірі базуються на нестационарних та стохастичних явищах. Вперше одержано пояснення природи формування величини тривалості перехідного процесу при встановленні достовірного сигналу електрохімічної системи амперометричного сенсора.

Визначення нестационарної сутності надповільних корозійних процесів на матеріалах з мікро- і нано-структурованою поверхнею дозволило виявити вплив старіння продуктів корозії на механізм і кінетику електродних процесів. Вперше виявлено коливальні процеси корозійної природи, що відповідають за підтримання кінетичних характеристик процесів на електродах електрохімічних систем. Базуючись на понятті про надповільну корозію

розроблено методи штучного усунення небажаного дрейфу кінетичних параметрів електродних процесів. Враховуючи напівпровідникову природу продуктів корозії використано явище фотоефекту для досягнення локального перерозподілу швидкостей півреакцій надповільної корозії в умовах темплатних процесів формування мікро- і наноструктури поверхні. При цьому вперше застосовано темплат (стабілізований поліфункціональним олігомером нанодисперсний золь основної солі важкого металу), який одночасно транспортує у зону росту один з компонентів (іони важкого металу) утвореної напівпровідникової структури з нанорозмірною точністю. Нестационарні коливальні надповільні корозійні процеси підтримують одержані структури до 6 місяців і дозволили вперше розрізнити визначення двох окисників (озону та діоксиду азоту) на одному електроді без зміни потенціалу і застосування попередніх хімічних фільтрів.

(рос.)

Созданы научные основы коррозии микро- и наноструктурированных материалов в электрохимических системах сенсоров и суперконденсаторов, которые базируются на новой классификации коррозионных процессов. Научная новизна созданных основ состоит в экспериментальном выявлении и теоретическом обосновании решающей роли коррозионных процессов на кинетику электродных процессов при предельных режимах эксплуатации названных систем. Показано, что существующая десятибалльная шкала скорости коррозии, согласно которой до настоящего времени учитывалась только коррозия быстрее 0,001 мм/год, не пригодная для классификации коррозионных процессов в электрохимических системах сенсоров и суперконденсаторов. Доказана научно-техническая целесообразность учета коррозии микро- и наноструктурированных электродных материалов медленнее 0,001 мм/год, поскольку она определяет формирование как фоновых (шумовых) сигналов и саморазряда, так и аналитических и силовых токов целевой эксплуатации электрохимических систем.

Введено новое понятие – “сверхмедленная коррозия”, – комплекс процессов на основе окисления электродного материала с условным глубинным показателем скорости меньше 0,001 мм/год, с учетом которого проведенная классификация подобных и отличных особенностей названных систем и разработаны оригинальные методики исследований. Теоретически доказано и подтверждено экспериментально, что поддержание кинетических параметров электродных процессов в открытой электрохимической системе на стабильном уровне обеспечивается ходом сверхмедленной коррозии в условиях, которые разрешают противоречие между ростом гидрофиллизации электродов и возрастанием контактного и других сопротивлений при накоплении продуктов окисления и деструкции электродного материала. Впервые выявлены сверхмедленные (с периодом больше нескольких дней) изменения параметров электрохимических систем, притом, что до настоящего времени за этими параметрами признавали лишь дрейф с постоянным трендом, а колебательными считали лишь те изменения, которые происходили с частотой более нескольких кГц (для электрохимических шумов). При этом медленные колебания оставляли без внимания, безосновательно списывая их на естественные циклические изменения условий ведения экспериментов и эксплуатации.

Установлен механизм формирования основных кинетических характеристик процессов в открытых электрохимических системах (коэффициент преобразование, фоновый ток), которые отвечают стационарным условиям по определению, но в значительной степени базируются на нестационарных и стохастических явлениях. Впервые получены объяснения природы формирования величины длительности переходного процесса при установлении достоверного сигнала электрохимической системы амперометрического сенсора.

Определение нестационарной сущности сверхмедленной коррозии материалов с микро- и наноструктурированной поверхностью позволило дать объяснение старению каталитически активных материалов. Впервые выявлены колебательные процессы коррозионной природы, которые отвечают за поддержание кинетических характеристик процессов на электродах электрохимических систем. Базируясь на понятии о сверхмедленной коррозии разработаны

методы искусственного устранения нежелательного дрейфа кинетических параметров электродных процессов. Учитывая полупроводниковую природу продуктов коррозии использовано явление фотоэффекта для достижения локального перераспределения скоростей полуреакций сверхмедленной коррозии в условиях темплатных процессов формирования микро- и наноструктуры поверхности. При этом впервые применен темплат из стабилизированного полифункциональным олигомером нанодисперсного золя основной соли тяжелого металла, который одновременно транспортирует в зону роста один из компонентов (ионы трудного металла) наращиваемой полупроводниковой структуры с наноразмерной точностью. Нестационарные колебательные сверхмедленные коррозионные процессы поддерживают полученные структуры до 6 месяцев и позволили впервые различить определение двух окислителей (озона и диоксида азота) на одном электроде без изменения потенциала и применение предшествующих химических фильтров.

(англ.)

The scientific foundations of corrosion micro- and nano-structured materials in electrochemical systems, sensors and supercapacitors, which are based on the new classification of corrosive processes. Scientific novelty create a foundation is in the experimental and theoretical justification identifying the crucial role of corrosion processes on the kinetics of electrode processes under extreme operating conditions these systems. Show that there is a scale of corrosion rate, under which so far only taken into account corrosion faster 0.001 mm/year, is not suitable for classification of corrosion processes in electrochemical systems, sensors and supercapacitors. We prove the scientific and technical feasibility of accounting corrosion and micro-electrode materials nanostructured slower 0.001 mm / year, because it determines the formation as the background (noise) signals and the self-discharge and analytical power and current target operation of electrochemical systems.

Introduced a new concept - "infraslow corrosion" - a set of processes based on oxidation of the electrode material with a nominal depth indicative of the rate of less than 0.001 mm/year, based on which the classification of similar and different features of these systems and developed original methods of research. Theoretically proven and experimentally confirmed that the maintenance of kinetic parameters of electrode processes in the open electrochemical system provides stable progress infraslow corrosion under conditions that permit the growth of a contradiction between the electrodes and the hydrophilization increases contact resistance, and other products with a combination of oxidation and degradation of electrode material. For the first time revealed infraslow (with a period of more than a few days), change the parameters of electrochemical systems, despite the fact that until now these parameters recognized only drift with constant trend and vibrational thought only the changes that occurred with a frequency of a few kilohertz (for electrochemical noise). This slow oscillations disregarded, wrongly writing off their natural cyclical changes in the conditions for experimentation and exploitation.

The mechanism of formation of the basic kinetic characteristics of processes in open electrochemical systems (conversion factor, the background current) which meet the conditions fixed by definition, but to a large extent based on the unsteady and stochastic phenomena. For the first time explain the nature of the formation of the value of the duration of the transition process in establishing a reliable signal of the electrochemical amperometric sensor system.

Determination of the non-stationary nature of infraslow corrosion materials with micro and surface nanostructured allowed to give an explanation of aging catalytically active materials. For the first time revealed the corrosive nature of oscillatory processes that are responsible for maintaining the kinetic characteristics of processes at the electrodes of electrochemical systems. Based on the concept of infraslow corrosion developed methods of artificial elimination of unwanted drift kinetic parameters of electrode processes. Given the nature of the corrosion products semiconductor, photoelectric effect is used to achieve local redistribution half reaction speeds infraslow corrosion in templating processes of formation of micro- and nanostructure surface. For the first time used a template from a polyfunctional oligomer stabilized nanosized sol salt of heavy metal, which simultaneously carries in the growth zone of the components (heavy metal ions) to build a

semiconductor structure with nano-sized accuracy. Unsteady oscillating infraslow corrosion processes support structure received up to 6 months and allowed for the first time to distinguish between the definition of the two oxidants (ozone and nitrogen dioxide) at one electrode without changing the building and without prior chemical filters.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

- Електрохімічна комірка для визначення хлору у повітрі в широкому діапазоні концентрацій; Назва охоронного документу - Патент України на корисну модель; № 82969 дата 27.08.2013
- Амперометричний сенсор для визначення кисню у повітрі; Назва охоронного документу - Патент України на корисну модель ; № 84847 дата 11.11.2013

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Перевищують світовий рівень з огляду на розробку нового поняття в теорії корозії, яке дозволило цілеспрямовано створити електродний матеріал, який за своєю селективністю не має аналогів у світі.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування на практиці розроблених наукових засад дозволить створити технології виготовлення електродів специфічної селективності та у перспективі має сприяти покращенню властивостей електродів суперконденсаторів. Оскільки один сенсор, створений на одержаних матеріалах, може замінити собою систему з двох сенсорів і спеціального хімічного фільтра з установкою для пробовідбору, то очікуваний економічний ефект можна оцінити як зниження собівартості газоаналітичного устаткування щонайменше у 2 рази.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Розроблені наукові засади можуть бути використані у вищих навчальних закладах при викладанні курсу “Корозія металів та захист металів від корозії” та при дослідженні проблем перехідних характеристик пристроїв на основі контакту метал-напівпровідник, які широко використовуються у сучасній електронній техніці. Розроблені наукові засади мають бути використані для розробки Державного Стандарту з новою класифікацією корозійної стійкості матеріалів, що доповнить або замінить ГОСТ 13819-68 "Коррозия металлов. Десятибальная шкала коррозионной стойкости".

8. Стан готовності розробки.

Розроблені наукові засади викладені у публікаціях у періодичних фахових виданнях, у т.ч. що входять до наукометричних баз даних, а відпрацьовані методики підготовки поверхні електродів зі специфічною селективністю викладені у заключному звіті й готові до подальшого розвитку у дослідження прикладного спрямування.

9. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи використані в учбовому процесі при вивченні кінетики електродних процесів з дисципліни “Теоретична електрохімія” (нова тема “Аодне розчинення металів” у розділі “Нерівноважні процеси”), “Корозія металів” (нова тема “Спряжені реакції в корозійних процесах” у розділі “Теорія корозії металів”), “Методи захисту обладнання від корозії” (нова тема “Грунтова корозія” у розділі “Природні корозійні середовища”), а також у вдосконаленні спеціалізованих дисциплін “Сучасні проблемні питання технічної електрохімії” (створення нової теми “Засоби моніторингу корозії конструкцій під катодним захистом”). Розроблено методику визначення параметрів нестационарних надповільних корозійних процесів в мініатюрних електрохімічних системах. Результати фундаментальних досліджень нестационарних надповільних корозійних процесів мають стати науковою базою для моделювання сталого сигналу електрохімічних сенсорів та сприятимуть прискоренню прикладних розробок в галузі новітніх сенсорних систем та суперконденсаторів.

10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", хіміко-технологічний факультет, кафедра технології електрохімічних виробництв. 204-82-06, [o_lin@xtf.kpi.ua](mailto:olin@xtf.kpi.ua)

11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

Статті у виданнях, що входять до наукометричних баз даних:

1. Линючева О.В., Букет А.И., Блуденко А.В., Ващенко А.Н. Прогнозирование влияния коррозии на характеристики амперометрических сенсоров // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – Т. 3(9). – № 2/2012. – С. 83-88.
2. Линючева О. В., Букет А. И., Нагорный А.В. Гомогенный медиаторный катализ для увеличения коэффициента преобразования амперометрических сенсоров // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies* – Т. 3 (9). – № 4/2012. – С. 89-94.
3. Янушевская Е.И., Супрунчук В.И., Букет А.И. Взаимодействие полигексаметиленгуанидина с ионами Pb(II) // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2013. – № 3(42). – С. 205-208.
4. Янушевская Е.И. Супрунчук В.И., Букет А.И. Особенности взаимодействия полигексаметилен гуанидина с Zn (II) // *SWorld. Сельское хозяйство: Химия*. - 2014. - № 4(37). - Т. 30. - с. 80-83.
5. Букет О.І., Лінючева О.В., Блуденко А.В., Нагорний О.В. Вплив корозії на приведеній опір утворення струмового сигналу амперометричного сенсора // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2014. - № 5 - с. 81-86
6. Buket O., Linyucheva O., Nahorniy O., Bludenko A., Linyuchev O. Extending the range of amperometric sensors // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2015. – № 9(2). – P. 251–255
7. Букет А. И., Линючева О. В., Нагорный А. В., Линючев А. Г. Электрохимический сенсор хлора на основе галогенидного электролита с медиатором для аварийных выбросов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 6(72). – С.42–47.
8. Vasylyiev G.S. The influence of flow rate on corrosion of mild steel in hot tap water // *Corrosion Science*. – 2015. - Vol. 98. – P. 33–39.

Статті у вітчизняних фахових виданнях:

9. О. І. Букет, О. В. Лінючева, А. В. Блуденко, О. В. Нагорний, О. Г. Лінючев Вплив електроосмотичних явищ на час перехідних процесів у амперометричних газових сенсорах // *Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал*. – 2013. – № 6(92). – С. 83-88.
10. Букет А.И., Линючева О.В., Блуденко А.В., Нагорный О.В. Влияние нестационарного массообмена по воде на токообразующую поверхность газодиффузионного электрода амперометрического сенсора // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2013. - 4. - С. 74-79
11. Букет А.И., Линючева О.В., Нагорный А.В., Линючев А.Г. Электрохимический сенсор хлора на основе галогенидного электролита с медиатором для аварийных выбросов // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 6/6(72). – с. 42-47
12. Букет О.І. Вплив надповільної корозії на тривалість перехідних процесів в амперометричних газових сенсорах // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. - №3. - 2015. - с. 23-26

Закордонні конференції:

13. International Youth Science Environmental Forum “Ecobaltica – 2013”; Назва держави - Росія; Назва доповіді - Polyhexamethylenguanidine’s interactions with heavy-metal

ions; Автори - – Yanushevskaya E.I., Suprunchuk V.I., Buket O.I., Nyzhnik T.Yu.; Місце проведення - St.-Petersburg, Russia; Дата проведення: 06.12.2013

Міжнародні конференції:

14. VI Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та молод. вчених «Хімія та сучасні технології»; Назва доповіді - Природа ограниченной верхней границы измерения сенсоров хлора; Автори - Нагорный А.В. Линючева О.В. Букет А.И. Блуденко А.В. ; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 24.04.2013
15. VI Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та молод. вчених «Хімія та сучасні технології»; Назва доповіді - Вплив корозії на коефіцієнт перетворення амперометричного сенсора ; Автори - Блуденко А.В., Букет О.І., Лінючева О.В. ; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 24.04.2013
16. V Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології ; Назва доповіді - Вплив рН на кінетику гіпохлориту та хлору на титановому електроді; Автори - Нагорний О.В., Лишафай Д.Ф., Букет О.І.; Місце проведення - Київ, НТУУ "КПІ"; Дата проведення: 10.04.2014
17. V Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології; Назва доповіді - Вплив електроосмотичних явищ на величину струмоутворюючої поверхні газодифузійного електрода; Автори - Ходак К.В., Букет О.І., Лінючева О.В.; Місце проведення - Київ, НТУУ "КПІ"; Дата проведення: 10.04.2014
18. Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології; Назва доповіді - Етерифікація спирту як причина проблем при нанесенні гальванічних покриттів на кремній; Автори - Єрстова О.Л., Букет О.І., Яцюк Л.А.; Місце проведення - Київ, НТУУ "КПІ"; Дата проведення: 10.04.2014
19. VI Міжнар. наук.-техн. конф. "Новітні енерго- та ресурсозберігаючі хімічні технології без екологічних проблем"; Назва доповіді - Взаимодействие полигексаметиленгуанидина с ионами Pb(II) ; Автори - Янушевская Е.И., Супрунчук В.И, Букет А.И.; Місце проведення - ОНПУ, Одеса; Дата проведення: 09.09.2013
20. IV Intern. Conf. "Modern problem of physical chemistry"; Назва доповіді - Влияние локальных изменений активности воды и гидрофилизации рабочего электрода на коэффициент преобразования амперометрического сенсора; Автори - Линючева О.В., Букет А.И., Блуденко А.В., Ходак Е.В.; Місце проведення - ІФОХКХ НАН України ім. Л.М. Литвиненко, Донецьк; Дата проведення: 09.09.2013
21. IV Intern. Conf. "Modern problem of physical chemistry"; Назва доповіді - Расширение рабочего диапазона и увеличение коэффициента преобразования сенсора хлора при помощи гомогенного медиаторного катализа; Автори - Линючева О.В., Букет А.И., Нагорный О.В., Лінючев О.Г., Косогін О.В.; Місце проведення - ІФОХКХ НАН України ім. Л.М. Литвиненко, Донецьк; Дата проведення: 09.09.2013
22. Науково-практична конференція "Технології очищення води - технічні, біологічні та екологічні аспекти" пам'яті проф. В. Свентославського; Назва доповіді - Применение полигексаметиленгуанидина для очистки воды от ионов тяжелых металлов (с. 56-57); Автори - Янушевская Е.И., Супрунчук В.И., Букет А.И., Нижник Т.Ю.; Місце проведення - Київ, НТУУ "КПІ"; Дата проведення: 04.12.2013
23. III Міжнародна конференція «Електрохімічний захист і корозійний контроль»; Назва доповіді - Оцінка внеску корозії у фоновий струм на стадії проектування амперометричного сенсора; Автори - Букет О.І., Лінючева О.В., Блуденко А.В., Нагорний О.В.; Місце проведення - Технологічний інститут СНУ ім. В.Далія; Дата проведення: 25.09.2013

24. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Вплив гранулометричного складу робочого електрода на похибку відтворення коефіцієнту перетворення амперометричного сенсора; Автори - Букет О.І., Яцишина Н.Ю., Ващенко О.М.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 27.04.2015
25. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Вплив товщини робочого електрода амперометричного сенсора на похибку відтворення його коефіцієнту перетворення; Автори - Букет О.І., Талашок І.В., Нагорний О.В.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 27.04.2015
26. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Вплив товщини робочого електрода амперометричного сенсора на приведений опір його струмоутворюючого процесу; Автори - Букет О.І., Смик А.О., Нагорний О.В.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 27.04.2015
27. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Електрохімічний шум в амперометричних сенсорах; Автори - Букет О.І., Зінчук О.В., Фатєєв Ю.Ф.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ;
28. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Осадження витратного матеріалу анода амперометричного сенсора імпульсним методом; Автори - Букет О.І., Дудко В.О., Мотронюк Т.І.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 27.04.2015
29. VII-th International conference of chemistry and modern technology for students and post-graduate students; Назва доповіді - Роль окислення поверхні графену у роботі електродного матеріалу літій-іонного акумулятора; Автори - Букет О.І., Кожушко Е.О., Яцюк Л.А.; Місце проведення - Дніпропетровськ, УДХТУ; Дата проведення: 27.04.2015

Всеукраїнські конференції:

30. 1. V Всеукр. наук. конф. студ. та аспір. «Хімічні Каразінські читання – 2013»; Назва доповіді - Стабілізація коефіцієнту перетворення амперометричного газового сенсора окисдуванням робочого електрода; Блуденко А.В., Букет О.І., Нагорний О.В., Лінючева О.В., Ходак К.В. ; Місце проведення - Харків, ХНУ ім. В.Н. Каразіна; Дата проведення: 22.04.2013

Виставки вітчизняні:

31. Екологія 2013; Назва експонату - Електрохімічні сенсори уніфікованої серії НТУУ "КПІ"; Автори - Лінючева О.В., Букет О.І., Косогін О.В – 2013
32. Виставка наукового парку НТУУ "КПІ"; Назва експонату - Електрохімічні сенсори уніфікованої серії НТУУ "КПІ"; Автори - Лінючева О.В., Букет О.І., Косогін О.В., Кушмирук А.І., Нагорний О.В., Мірошніченко Ю.С. – 2013 – 2015.

Закордонні виставки:

33. Австрія; Научно-техническая выставка Collini Gruppe, Hohenems, Osterreich, 2014; Назва експонату - Електрохімічні сенсори уніфікованої серії НТУУ "КПІ"; Автори - Лінючева О.В., Букет О.І., Косогін О.В., Кушмирук А.І., Нагорний О.В., Мірошніченко Ю.С. – 2014