

**Розробка комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації**

**Разработка комплексной интеллектуальной системы мониторинга элементов конструкций в эксплуатации**

**Development of the complex smart monitoring system construction elements at the operation**

1. **Номер державної реєстрації теми - 0113U000498, НТУУ «КПІ» - 2655-п.**
2. **Науковий керівник -** д.т.н., проф. Бурау Н.І., Бурау Н.И., Bouraou Nadiia I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Для моніторингу металевих та неметалевих елементів конструкцій в експлуатації запропоновано та обґрунтовано розробку комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій, яка відноситься до нового класу діагностичних систем на основі концепції Structural Health Monitoring.

Проведено структурно-функціональний синтез системи, в результаті якого: розроблено узагальнену структурну схему та обґрунтовано принцип функціонування системи; розроблено функціональну схему багатоканальної системи моніторингу елементів конструкцій зварних резервуарів для оцінки статичних та динамічних навантажень на елементи конструкції та оцінки поточного технічного стану об'єкту; обґрунтовано використання датчиків первинної інформації, побудованих на різних фізичних принципах, сформовано такі вимірювальні канали багатоканальної системи: канали вимірювання вібрації; канали інклінометрії; канали вимірювання деформації. Розроблено структурні схеми, проведено моделювання та аналіз вимірювальних каналів.

Розроблено діагностичний сервер для керування процесами вимірювання, реєстрації, перетворення, передачі та комплексного аналізу даних, прийняття рішення про поточний технічний стан конструкції та експлуатаційні навантаження. Розроблено алгоритмічне й програмне забезпечення, створено графічний інтерфейс передачі й збереження діагностичних даних на основі зовнішнього модуля АЦП, який підтримує взаємодію із системою у системі LabVIEW. Запропоновано та обґрунтовано побудову класифікатора технічного стану на основі імовірнісної нейронної мережі, яка забезпечує нелінійне розділення простору ознак. Підтверджено ефективність розробленого класифікатора при розпізнаванні бездефектного та дефектного (відносний розмір тріщини 0,05) станів елементу конструкції за двовимірними ознаками. Розроблено керуючий модуль, як складову діагностичного серверу, який програмно реалізовано у вигляді віртуального приладу в системі LabVIEW. Розроблено методику та проведено перевірку працездатності модуля опитування датчиків первинної інформації на тестових сигналах та на сигналах датчиків вібрації, в результаті підтверджено працездатність створеного віртуального приладу та стабільність роботи мережевого інтерфейсу і каналу зв'язку.

Для металевих та неметалевих елементів конструкцій об'єктів авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, інженерних споруд спеціального призначення розроблено методики визначення параметрів та характеристик технічного стану та експлуатаційних навантажень.

**(рос.)**

Для мониторинга металлических и неметаллических элементов конструкций в эксплуатации предложено и обосновано разработку комплексной интеллектуальной системы мониторинга технического состояния конструкций, которая относится к новому классу диагностических систем на основе концепции Structural Health Monitoring.

Выполнен структурно-функциональный синтез системы, в результате которого разработана обобщенная структурная схема и обоснован принцип функционирования системы; разработана функциональная схема многоканальной системы мониторинга элементов конструкций сварных резервуаров для оценки статических и динамических нагрузок и

оценки текущего технического состояния объекта; обосновано использование датчиков первичной информации, построенных на различных физических принципах, сформированы такие измерительные каналы системы: канал измерения вибрации, канал инклинометрии, канал измерения деформации. Разработаны структурные схемы, выполнено моделирование и анализ характеристик измерительных каналов.

Разработан диагностический сервер для управления процессами измерения, регистрации, преобразования, передачи и анализа данных, принятия решения о текущем техническом состоянии конструкций и эксплуатационных нагрузках. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, создан графический интерфейс передачи и сохранения диагностических данных на основе внешнего модуля АЦП, который взаимодействует с системой LabVIEW. Предложено и обосновано построение классификатора технического состояния на основе вероятностной нейронной сети, которая обеспечивает нелинейное разделение признаков. Подтверждена эффективность разработанного классификатора при распознавании бездефектного и дефектного состояний (относительный размер трещины 0,05) элемента конструкции по двумерным признакам. В составе диагностического сервера разработан модуль управления, который программно реализован в виде виртуального прибора в системе LabVIEW. Разработана методика и проверена работоспособность модуля опроса датчиков первичной информации на тестовых сигналах и сигналах датчиков вибрации, в результате подтверждена работоспособность виртуального прибора и стабильность работы сетевого интерфейса и каналов связи.

Для металлических и неметаллических элементов конструкций объектов авиационной техники, машиностроения, энергетики, инженерных сооружений специального назначения разработаны методики определения параметров и характеристик технического состояния и эксплуатационных нагрузок.

**(англ.)**

The development of the complex smart system of technical condition monitoring is offered and is supported for monitoring of metal and nonmetallic elements of construction at the operation, which concerns a new class of diagnostic systems on the basis of concept Structural Health Monitoring.

Structurally functional synthesis of system is carried out. The generalized block diagram is developed, and the principle of functioning of system is proved. The functional chart of multi-channel system of monitoring of construction elements of welded tanks is developed for an estimation of static and dynamic loadings and an estimation of a current technical condition of the testing object. The following measuring channels of system are generated: the channel of measurement of vibration, the channel inclinometer, the channel of measurement of deformation. Block diagrammes are developed, simulation and the analysis of characteristics of measuring channels is carried out.

The diagnostic server is developed for management of processes of measurement, registration, transformation, transfer and the analysis of data, decision-making on a current technical condition and operational loadings. Algorithms and the software, the graphic interface of program and conservation of diagnostic data are developed on the basis of external module ADT which co-operates with system LabVIEW. The qualifier of a technical condition on the basis of a probability neural network is developed, which provides nonlinear classification diagnostics data. Efficiency of the developed qualifier is confirmed at recognition of faultless and defective conditions (the relative size of a crack 0,05) of elements by using two-dimensional features. As a part of a diagnostic server the module of management is developed. It is realized as virtual device in system LabVIEW. The working capacity of the virtual device and stability of work of the network interface and communication channels is confirmed.

Techniques of definition of parameters and characteristics of a technical condition and operational loadings are developed for metal and nonmetallic elements of aviation construction, mechanical engineering objects, power objects, engineering constructions of a special purpose.

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

1. Пат. 82968 Україна. МПК G01M7/00. Автоматизований діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану будівель та споруд / Бурау Н.І., Ку-

зько А.В., Жуковський Ю.Г., Шевчук Д.В., Цибульник С.О., Артем'єва Г.М. Вла-  
сник: Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут». заявл. 06.02.2013, опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.- 4с.

2. Пат. 93638 Україна, МПК6 G01C 21/00. Спосіб усунення перехресних похибок у надлишкових блоках двокомпонентних інерціальних датчиків [Текст] / В.В. Мелешко, А.В. Зазімко, С.Л. Лакоза. – u201404645; заявл. 30.04.2014; опубл. 10.10.2014, бюл. № 19/2014. – 7 с.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати відповідають світовому рівню, для отримання діагностичної інформації запропоновано використати датчики вібрації 4511-001 (Briel & Kjaer) та ADXL202 (Analog Devices), тензорезистори КФ5Ц4 (Веда), інклінометри ІІМ-01 (Лимако), що відповідають кращим зразкам датчиків первинної інформації. Вперше для системи моніторингу класифікатор стану розроблено на основі імовірнісної нейронної мережі, що забезпечує нелінійне розділення простору ознак на стани, виявлення пошкодження (тріщина, розшарування) з відносним розміром не більше 0,05 з вірогідністю контролю не нижче 0,95. Система реалізує концепцію Structural Health Monitoring, розробка таких систем є важливою та актуальною проблемою в усіх найбільш технічно розвинутих країнах світу, вітчизняних аналогів немає.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Отримані при виконанні наукових досліджень результати є основою для створення сучасної вітчизняної комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації, в якій реалізується концепція Structural Health Monitoring. Розробка та впровадження комплексних інтелектуальних систем моніторингу в авіаційній галузі (при створенні нових зразків авіаційної техніки для підвищення її надійності, ефективності та конкурентоспроможності на світовому авіаційному ринку), в нафтогазовій галузі (моніторинг цілісності трубопроводів та ємностей з еколого-небезпечними речовинами, у тому числі резервуару з паливом на українській антарктичній станції Академік Вернадський), для інженерних споруд спеціального призначення (гідротехнічних споруд, захисних споруд, мостів, підземних сховищ) матиме значний економічний та соціальний ефект:

- підвищення економічної ефективності експлуатації об'єктів на 25% за рахунок зменшення витрат на технічне обслуговування;
- попередження руйнування елементів конструкції, і, як наслідок, матеріальних збитків;
- збереження довкілля.

**7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).** Результати досліджень доцільно впровадити у розробки нових систем моніторингу об'єктів паливно-енергетичного комплексу (резервуари, трубопроводи) на українській антарктичній станції Академік Вернадський (ДУ Національний антарктичний науковий центр, м. Київ), у системи моніторингу технічного стану авіаційних конструкцій (Конструкторське бюро Контрольних приладів, м. Київ), перспективних пристроїв контролю вібрації для авіаційних газотурбінних двигунів вітчизняного виробництва (ПАТ «НТК «Електронприлад», Авіаційний науково-технічний центр «Авіадіагностика», м. Київ).

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблені схеми, алгоритмічне та програмне забезпечення, методики. Виконані підготовчі роботи для розробки макету багатоканальної системи моніторингу просторового об'єкту (на прикладі резервуарів).

#### **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати впровадження:

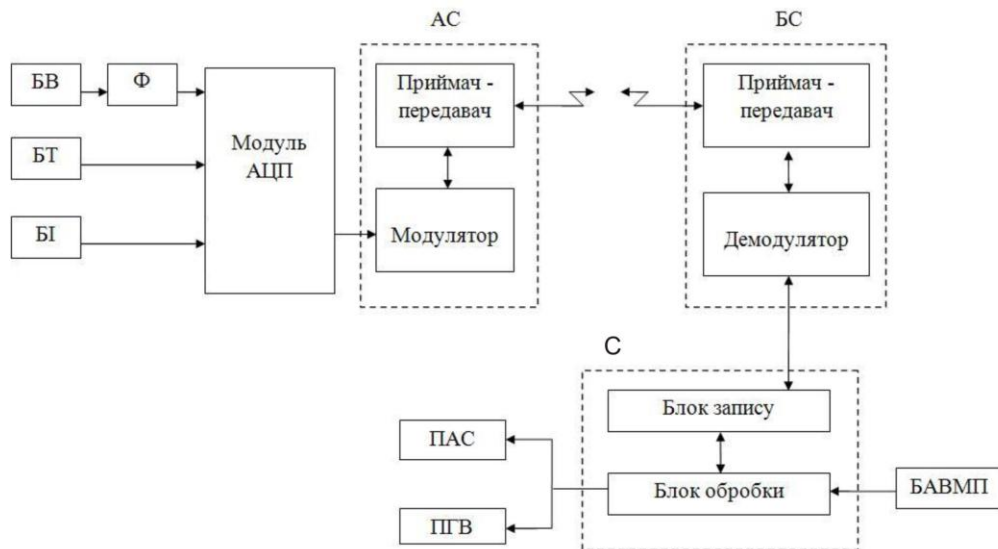
- в ДУ Національний антарктичний науковий центр: структура системи моніторингу, вимірвальні канали, діагностичний сервер – використовуються для розробки автома-

тизованої системи раннього попередження можливості витoku палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський;

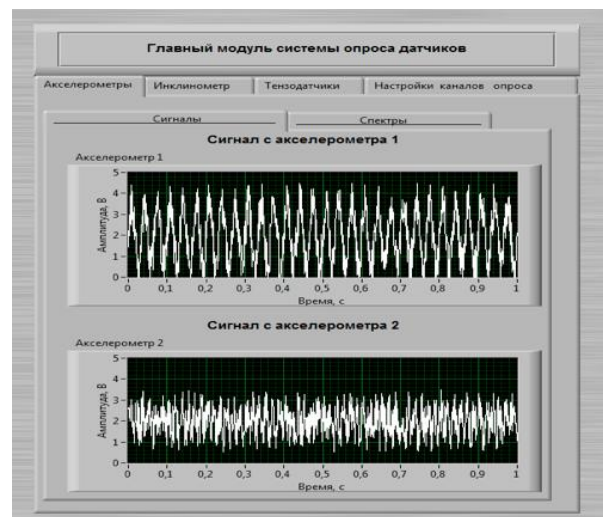
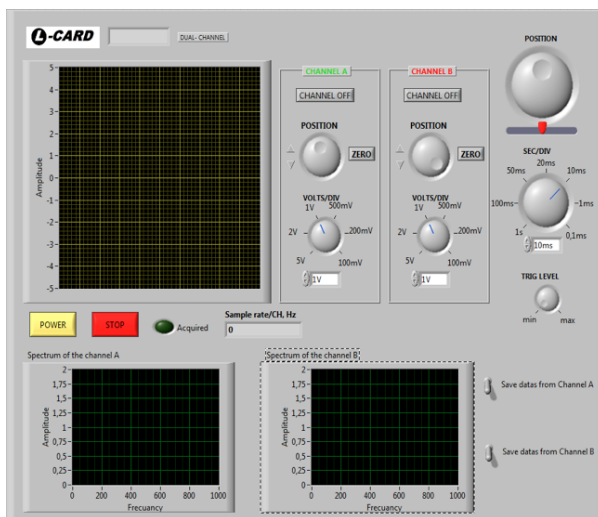
- в ПАТ «НТК «Електронприлад»: алгоритмічне та програмне забезпечення використано при розробці алгоритмічного та програмного забезпечення для системи вібраційного контролю газотурбінного двигуна.

### 10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ"КПІ", приладобудівний факультет, кафедра приладів і систем орієнтації та навігації, 406-85-02, [burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua)



Загальна структурна схема системи моніторингу резервуарів: БВ – блок вібродатчиків; БТ – блок тензодатчиків; БІ – блок інклінометрів; АС – абонентська станція; БС – базова станція; ПГВ – пристрій графічного відображення; БАВМП – блок автоматизованого визначення метеорологічних параметрів; ПАС – пристрій аварійної сигналізації; С – сервер



Загальний вигляд лицьової панелі віртуального приладу синхронного багатоканального зчитування даних АЦП Е14-140

Загальний вигляд лицьової панелі модуля опитування датчиків

### 11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки - Монографії

1. Бурау Н.І. Розпізнавання технічного стану об'єктів на основі штучних нейронних мереж [Текст]/ Н.І. Бурау, О.В.Зажицький. – К.:НАУ, 2014. – 120 с.

- Навчальні посібники (електронне видання)

1. Аврутов В.В. Надежность и диагностика приборов и систем: Учебное пособие/ В.В. Аврутов, Н.И. Бурау. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 156 с.

- **Статті в іноземних виданнях, що входять до НМБД SCOPUS:**

1. Ignanovich S.R. The reliability of detection cracks during nondestructive testing of aircraft components / N.I. Bouraou, S.R. Ignanovich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49. – No 5. – pp. 294-300.
2. Pavlovskiy O. On-board vibration diagnostics of shaft damage of the aviation engine / O. Pavlovskiy, N. Bouraou// Vibrations in Physical Systems. – 2014. – Vol.26. – P. 229-234.

- **Статті у фахових виданнях України, що входять до інших НМБД (eLIBRARY.RU (РИНЦ), Index Copernicus, IET Inspect, Google Scholar):**

1. Вимоги до розробки інформаційно-діагностичного комплексу моніторингу резервуарів з паливом у умовах Антарктики / Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.В. Кузько, С.О.Цибульник, Д.В.Шевчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С.107-115.
2. Разработка и исследование цифровых следящих фильтров для системы контроля вибрации авиационного двигателя на нестационарных режимах / Н.И. Бурау, А.М. Павловский, Л.Л. Яцко, А.В. Иванченко// Авиационно-космическая техника и технология. – 2013.– №. 10(107) – С. 171-176. *(Зі студентом)*
3. Павловський О.М. Використання пакету LabVIEW для моделювання та аналізу ефективності системи обробки вібраційних сигналів авіаційного двигуна. /О.М. Павловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – №45. – С. 148-157.
4. Аврутов В.В. Исследование инерциального измерительного модуля с USB-портом/ В.В. Аврутов, С.В. Царенко// Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип. 44. – С. 24-28. *(Зі студентом)*
5. Цибульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 1. Построение геометрической модели обтекателя/ С.А. Цибульник// Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – №46. – С. 80-85.
6. Цибульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 2. Моделирование ветровой нагрузки/ С.А. Цибульник// Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2014. – №47. – С.119-126.
7. Бурау Н.И. Оценка достоверности контроля трещин в авиационных конструкциях/ Н.И. Бурау, С.Р. Игнатович, Л.А. Хумарян// Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – №4– С. 71-78.
8. Бурау Н.І. Структурно-функціональний синтез систем діагностики конструкцій в експлуатації / Н.І. Бурау, О.М. Павловський, Д.В. Шевчук// Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – Том 72. – №4. – С. 77-86.

- **Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України:**

1. Бурау Н.И. Применение волоконно-оптических датчиков для контроля и диагностики элементов конструкций гражданского строительства / Н. И. Бурау, Л.А. Афанасьева // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: мат. 21 ежег. междун. конф. 7-11 октября [2013]. – Укр. ИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2013. - С. 151-153.
2. Аврутов В.В. Влияние комбинированного воздействия на переходную характеристику слабо и сильно демпфированного акселерометра/ В.В. Аврутов, Д.В. Аврутова// Современные технологии в системах управления и вооружении: мат. междун. науч.-техн. конф. [2013]. – Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2013. – С.3-13.
3. Аврутов В.В. Исследование вариаций Аллана на примере инерциального измерительного модуля/В.В. Аврутов, С.В. Царенко// Современные технологии в системах управления и вооружении: мат. междун. науч.-техн. конф. [2013]. – Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2013. – С.86-91. *(Зі студентом)*

4. Моделювання найбільш небезпечного сценарію руйнування зварних швів резервуару для палива і розливу палива на станції Академік Вернадський/ О.В. Кузько, Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.А. Киричук// Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 22-23.
5. Жуковский Ю.Г. Безопасная эксплуатация резервуаров с топливом в условиях Антарктики/ Ю.Г. Жуковский, Н.И. Бурау, А.В. Кузько// Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 34-36.
6. Павловський О.М. Апаратна платформа ARDUINO під керуванням NI LABVIEW/О.М. Павловський// Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 41-42.
7. Резервуар для пального: кількісна оцінка загроз, що призводять до аварій/ О.В. Кузько, Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.А. Киричук, О.О. Лук'янченко// Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства: 6 Міжнар. Атаркт. конф.: Зб. тез. – Київ, 2013. – С. 341-342.
8. Цибульник С.О. Зменшення динамічних збурень, викликаних вітровим навантаженням на резервуар для пального/С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук// Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства: 6 Міжнар. Атаркт. конф.: Зб. тез. – Київ, 2013. – С. 352-353.
9. Павловський О.М. Реалізація вимірювального каналу із зовнішнім блоком АЦП// О.М. Павловський, Р.Ю. Сverdlov// Методи і засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 4 наук.-практ. конф. студ. і мол. учен.: Зб. тез. – Івано-Франківськ: НТУНГ, 2013. – С. 162. *(Зі студентом)*
10. Разработка и исследование цифровых следящих фильтров для системы контроля вибрации авиационного двигателя на нестационарных режимах / Н.И. Бурау, А.М. Павловский, Л.Л. Яцко, А.В. Иванченко//18 Міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доп. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2013.– С. 128. *(Зі студентом)*
11. Лакоза С.Л. Калібрування мікромеханічних акселерометрів/ С.Л. Лакоза, М.С. Капиця// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 19-20. *(Зі студентом)*
12. Лакоза С.Л. Особливості та можливості застосування скалярної калі бровки для акселерометрів/ С.Л. Лакоза, В.В. Мелешко// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 18-19.
13. Цибульник С.А. Функциональная диагностика резервуаров для хранения экологически опасных веществ/ С.А. Цибульник// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 24-25.
14. Бурау Н.І. Теорія фракталів та її застосування в задачах обробки інформації/ Н.І. Бурау, О.Я. Паздрій// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 30-31. *(Зі студентом)*
15. Павловський О.М. Розширення функціональних можливостей бортових систем контролю вібрації авіаційних двигунів/ О.М. Павловський, Н.І. Бурау// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 17-18.
16. Жуковский Ю.Г. Конструктивная безопасность металлических резервуаров для хранения нефтепродуктов/ Ю.Г. Жуковский, А.В. Кузько// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 37-39.
17. Шевчук Д.В. Моделювання вимірювальних каналів системи контролю будівельних споруд/ Д.В. Шевчук, С. С. Рупіч// Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 37-39. *(Зі студентом)*
18. Ільчук С.В. Особливості конструкції сучасних навігаційних акселерометрів/ С.В. Ільчук, С.Л. Лакоза// Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: X між-

- нар. наук.-практ. конф. студ., асп., мол. вч.: Зб. тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 21. *(Зі студентом)*
19. Кузнецов О.В. Універсальний комутуючий пристрій// О.В. Кузнецов, О.М. Павловський// Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси «ІРТК-2014»: 7 міжнар. наук.-практ. конф.: Зб. тез. – К.:НАУ, 2014. – С. 221-222. *(Зі студентом)*
  20. Бурау Н.І. Розробка діагностичного серверу для систем моніторингу SHM/ Н.І. Бурау, Р.Ю. Свердлов// Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси «ІРТК-2014»: 7 міжнар. наук.-практ. конф.: Зб. тез. – К.:НАУ, 2014. – С. 240-241. *(Зі студентом)*
  21. Кузнецов А.В. Универсальный вибрационный преобразователь/ А.В. Кузнецов, А.М. Павловский// Новые направления развития приборостроения: 7 межд. студ. науч.-техн. конф.: Сб. тез. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 124. *(Зі студентом)*
  22. Калибровка микромеханического акселерометра/ Литош А.М., Гайдай В.В., Шекольян А.А., Аврутов В.В.// Новые направления развития приборостроения: 7 межд. студ. науч.-техн. конф.: Сб. тез. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 40.
  23. Луцив Т.В. Проблема разрушения горной скалы «Ласточкино гнездо» и методы ее исследования/ Т.В. Луцив, С.Л. Лакоза// Новые направления развития приборостроения: 7 межд. студ. науч.-техн. конф.: Сб. тез. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 287. *(Зі студентом)*
  24. Свердлов Р.Ю. Разработка диагностического сервера на базе современных микроконтроллеров/ Р.Ю. Свердлов, Н.И. Бурау// Новые направления развития приборостроения: 7 межд. студ. науч.-техн. конф.: Сб. тез. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 62. *(Зі студентом)*
  25. Гуцко И.О. Алгоритм самонастройки маятникового компенсационного акселерометра при воздействии периодических возмущений/ И.О. Гуцко, С.А. Цыбульник// Новые направления развития приборостроения: 7 межд. студ. науч.-техн. конф.: Сб. тез. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 104. *(Зі студентом)*
  26. Надежность металлических резервуаров с дизельным допливом в условиях Антарктики/ Н.И. Бурау, Ю.Г. Жуковский, А.В. Кузько, Д.В. Шевчук// Український антарктичний журнал. – 2013. – №12. – С. 335-349.