

УДК 62-752+621.825.7

І.І. Сидоренко, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Ткачов, канд. техн. наук, доц.,
О.А. Ткачов, магістр,
Одес. нац. політехн. ун-т

ВИКОРИСТАННЯ ПАСИВНОГО ПРУЖНОГО ПРИСТРОЮ З МЕХАНІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЯК ПРУЖИННОГО ДИНАМІЧНОГО ПОГАШУВАЧА КОЛИВАНЬ

І.І. Сидоренко, А.В. Ткачов, О.А. Ткачов. Використання пасивного віброізолюючого пристрою з механічним зворотним зв'язком як пружинного динамічного погашувача коливань. Проведено дослідження принципу дії, конструктивних особливостей і рекомендацій щодо застосування існуючих типів пружинних динамічних погашувачів коливань. Доведено ефективність активних пружинних динамічних погашувачів коливань. Обґрунтовано і висунено пропозицію про використання як пружинних динамічних погашувачів коливань пасивних віброізолюючих пристроїв з механічним зворотним зв'язком. Приведено перспективну конструкцію пружинного динамічного погашувача коливань з механічним зворотним зв'язком.

Ключові слова: пружинний динамічний погашувач коливань, нелінійні пружні характеристики, умова ефективного погашення коливань.

І.И. Сидоренко, А.В. Ткачев, А.А. Ткачев. Использование пассивного виброизолирующего устройства с механической обратной связью в качестве пружинного динамического гасителя колебаний. Проведены исследования принципа действия, конструктивных особенностей и рекомендаций по применению существующих типов пружинных динамических гасителей колебаний. Доказана эффективность активных пружинных динамических гасителей колебаний. Обосновано и выдвинуто предложение об использовании в качестве пружинных динамических гасителей колебаний пассивных виброизолирующих устройств с механической обратной связью. Приведена перспективная конструкция пружинного динамического гасителя колебаний с механической обратной связью.

Ключевые слова: пружинный динамический гаситель колебаний, нелинейные упругие характеристики, условие эффективного гашения колебаний.

I.I. Sydorenko, A.V. Tkachev, A.A. Tkachev. Use of passive vibroisolating device with mechanical feedback as a spring dynamic extinguisher of vibrations. The operating principle, design features and recommendations on application of the existing types of spring dynamic extinguishers of vibrations are investigated. Efficiency of active spring dynamic extinguishers of vibrations is well-proven. A suggestion of using vibrations of passive vibroinsulating devices with a mechanical feedback as spring dynamic extinguishers is put forward and substantiated. A perspective design of a spring dynamic extinguisher of vibrations with a mechanical feedback is adduced.

Keywords: inertia dynamic vibroextinguisher, nonlinear elastic characteristics, vibration damping condition.

Велика кількість пошкоджень в машинах і їх деталях відбувається в результаті виникнення в них коливань. Під впливом періодично змінних рушійних сил або моментів, наявності зовнішнього збурюючого коливного навантаження деталі і вузли машин здійснюють вимушені пружні або крутильні коливання. Вимушені коливання в машинах стають особливо відчутними в зоні резонансів, коли частоти збурюючих сил або моментів збігаються з частотами власних коливань системи. Вірогідність негативного впливу коливних процесів на роботу машини або ви-

никнення в її складових резонансних режимів значно зростає. Це у першу чергу пов'язано з інтенсифікацією технологічних процесів там, де застосовується відповідна машина, яка обумовлює значний діапазон змін її робочих швидкостей. Саме тому у конструкції машини повинна бути передбачена можливість значного зменшення дії коливних процесів або як мінімум їх регулювання, що вирішується шляхом ізоляції від коливних процесів або захисту від них.

Перше посилання на динамічний погашувач коливань Фрама зафіксовано у 1909 р. Метод динамічного погашення коливань, розроблений і реалізований за допомогою відповідної конструкції на початку XIX сторіччя, відноситься до напрямку захисту від коливань [1]. Даний метод полягає у приєднанні до об'єкта, що підлягає захисту від дії коливань (надалі — об'єкт), додаткового пристрою або декількох пристроїв з метою зміни його коливного стану.

Зміна коливного стану об'єкта при приєднанні додаткового пристрою може здійснюватися як шляхом перерозподілу енергії коливань від об'єкта до пристрою, так і у напрямку збільшення розсіювання енергії коливань завдяки додатковому пристрою. У першому випадку застосований пристрій називають динамічним погашувачем коливань, у другому — демпфером. Перерозподіл енергії коливань при використанні динамічного погашувача коливань реалізується завдяки налаштуванню системи об'єкт — динамічний погашувач коливань по відношенню до діючих частот вібраційних збурень шляхом корекції інерційних, пружних або масових властивостей системи. Якщо при застосуванні динамічного погашувача коливань налаштування системи здійснюється завдяки варіації її пружних (частіш пружно-масових) властивостей, то застосований динамічний погашувач називають пружинним динамічним погашувачем коливань (ПДПК). Оскільки для свого функціонування більшість ПДПК не потребують додаткового джерела живлення, то іноді їх називають *пасивними* ПДПК [2].

Незважаючи на конструктивні відмінності відомих ПДПК, усі вони мають однакову структуру (рис. 1, а). Погашувач складається з власної (для системи — додаткової) маси m_2 , яка приєднується за допомогою пружних елементів зведеної жорсткості c_2 до об'єкта масою m_1 . Ефект погашення коливань для об'єкта масою m_1 , який у свою чергу має пружний зв'язок зведеної жорсткості c_1 з нерухомим фундаментом, можна пояснити на прикладі аналітичного дослідження двомасової коливної системи з двома ступенями вільності, на першу масу якої діє зовнішнє гармонійне збурювання.

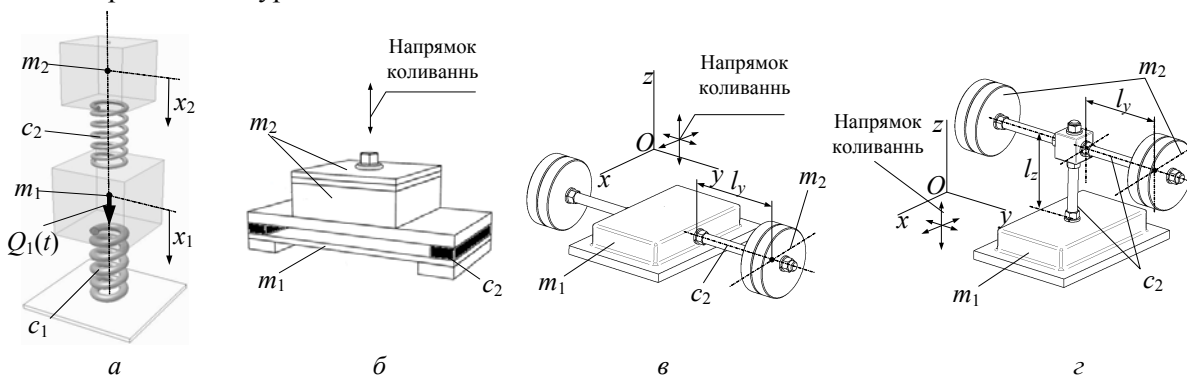


Рис. 1. Пасивний пружинний динамічний погашувач коливань: структурна схема (а); одноплосциний (б), одностержневий без опору на допоміжні механізми (в), багатостержневий без опору на допоміжні механізми (г)

Враховуючи переміщення першої m_1 і другої m_2 мас відповідними узагальненими координатами x_1 і x_2 , а також маючи на увазі, що маса m_2 не підлягає збурюванню, можна скласти систему з двох диференціальних рівнянь, які обумовлюють вимушені коливання системи. Проводячи аналітичні дослідження цієї системи, можна визначити, що при виконанні умови, яку іноді називають *умовою ефективного погашення коливань*,

$$p^2 = \frac{c_2}{m_2}, \quad (1)$$

отримано

$$x_1 = 0; \quad x_2 = -\frac{H_1}{c_2} \sin(pt + \delta), \quad (2)$$

де H_1 , p і δ — амплітуда, частота і фазовий кут зовнішнього гармонійного збурювання, відповідно.

Вираз (2) свідчить про повне погашення коливань першої маси m_1 , яка у цьому випадку буде здійснювати лише вільні коливання з частотою $k_1 = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m_1}}$.

З виразу (2) очевидно, що зміна частоти збурення обумовлює відповідні зміни налаштування системи об'єкт — ПДПК для виконання умов ефективного погашення коливань (1). На практиці це можливе двома шляхами. Перший з них полягає у зміні власної маси ПДПК по відношенню до зміни частоти збурювання. Наприклад, на рис. 1, б представлено конструкцію ПДПК з прямолінійним рухом власної маси, який застосовується для зниження просторових коливань поршневих герметичних компресорів [2, 3]. Пружний зв'язок c_2 між масами m_1 і m_2 цього ПДПК утворений за допомогою гумових брусків. Для зміни масових налаштувань системи об'єкт — ПДПК його власна маса m_2 виконана збірною з металевих пластин наперед визначеної маси, кількість яких при потребі змінюється.

Другий шлях, що обумовлює відповідні зміни налаштування системи об'єкт — ПДПК для виконання умови ефективного погашення коливань (1) полягає у зміні пружно-масових характеристик ПДПК. Роботи у цьому напрямку обумовили створення ПДПК *без опору на допоміжні механізми*, що застосовуються для гасіння коливань деяких конструкцій масляних насосів і генераторів [2]. Вони мають одну або декілька збірних власних мас m_2 , що закріплюються на стержні (рис. 1, в) або стержнях (рис. 1, з), які обумовлюють зведений пружний зв'язок c_2 між масами m_1 і m_2 . Стержень виконує роль консольно закріпленого пружного елемента, який працює на згин, що забезпечує більш гнучкі можливості налаштування завдяки не тільки варіації власної маси ПДПК, але і варіації відповідних консолей (l_y — на рис. 1, в і l_y, l_z — на рисунку 1, з).

Значною перевагою наведених конструкцій є їх відносна простота, що обумовлює їх виготовлення в умовах середньостатистичного машинобудівного підприємства. Але поширенню таких пристроїв в конструкціях машин перешкоджає наявність основного обмеження, пов'язаного з вимогами до зниження масового показника сучасного технічного виробу. Це обмеження пов'язане з тим, що значні зусилля при обмежених амплітудах коливання мас ПДПК наведеного типу можуть бути досягнуті лише при їх достатньо значній власній масі. Результати досліджень свідчать, що для ефективного вібропогашення маса ПДПК повинна складати не менш ніж 5...20 % від загальної приведеної маси початкової системи по відповідній формі коливань, в діапазоні частот якої виконується їх погашення [1, 3]. Окрім цього, основний недолік всіх розглянутих конструкцій полягає в тому, що їх переналаштування можливе лише у випадку їх повної зупинки і вилучення з експлуатації. Тобто, якщо частота збурення не є постійною впродовж технологічного циклу, то такі ПДПК не забезпечують відповідного погашення коливань, а у деяких випадках стають причиною виникнення додаткових динамічних навантажень на вузли та деталі машини [1, 2].

Розвиток електронної галузі, що привів до створення компактних активних з власним джерелом живлення систем вимірювання, аналізу та управління для механічних систем, дав наступний поштовх у розвитку ПДПК. Проведені дослідження і розробки дозволили встановити, що комбінування активних систем вимірювання і управління з пасивними ПДПК є досить вдалим [3]. Використання активних елементів розширює можливості динамічного погашення коливань, оскільки дозволяє проводити безперервне у режимі реального часу переналаштування парамет-

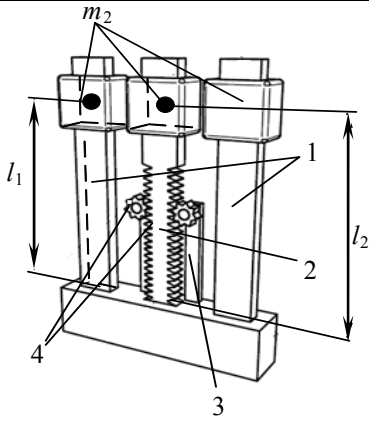


Рис. 2. Механічна частина активного АДВП

рів системи об'єкт — АДПК при зміні параметрів зовнішнього збурювання. Це дозволяє ефективно здійснювати погашення в умовах змінних технологічних вібраційних навантажень. Як приклад, що ілюструє принцип дії і свідчить про досить вдале комбінування активної системи вимірювання з пасивним АДПК, можна розглянути механічну частину одного з активних АДПК, який застосовують для погашення коливань прецизійного устаткування (рис. 2).

Механічна частина складається з стаціонарних 1 і рухомого 2 вібропоглиначів (власна маса m_2 на пружному елементі). Як і в конструкціях на рисунку 1, в, пружні характеристики пристрою обумовлені власними масами m_2 і відповідними консолями l_1, l_2 . При роботі пристрою у складі машини кожен з поглиначів починає незалежно поглинати енергію коливань у своєму частотному діапазоні, що приводить до зменшення вібрації та ліквідує небезпеку колорезонансного збудження їх коливань.

При зміні наперед визначених показників, які контролюються системами вимірювання й аналізу (на рисунку не показані), що відображають параметри збудження або вібраційного стану деталі або вузла машини, система управління у вигляді електродвигуна 3 і рейкової передачі 4 забезпечує відповідне збільшення або зменшення консолі l_2 . При цьому зміна пружної характеристики рухомого поглиначя визначає і зміну пружної характеристики АДПК в цілому. Однак, незважаючи на значні переваги активних АДПК, внаслідок значної вартості і складності обслуговування їх застосування зазвичай вибіркове і обмежене складним і унікальним обладнанням.

Дослідження систем з активними АДПК дозволили встановити, що за їх допомогою реалізується декілька видів пружних характеристик системи об'єкт — АДПК, які обумовлюють ефективне погашення коливань. Встановлено, що ці характеристики є нелінійними і описуються степеневими виразами з показниками степеня не вище чотирьох [2, 3]. У той же час проведений аналіз літературних джерел визначив, що аналогічні пружні характеристики можуть бути реалізовані за допомогою пасивних пружних пристроїв нової структури, відомими як пасивні пружні пристрої з механічним зворотним зв'язком [4, 5]. При цьому для них визначено основні положення, що обумовлюють їх роботоспроможність, та на основі теорії графів розроблено методику синтезу таких пристроїв [6].

У зв'язку з цим висунуто припущення щодо можливості створення на базі пасивних пружних пристроїв з механічним зворотним зв'язком ефективних пасивних АДПК з розширеними функціональними можливостями. Прототипом використано пристрій, формування конструкції якого проведено з використанням чотирьох основних складових елементів (рис. 3). Він складається з нерухокої платформи з напрямною 0 та рухомих платформи 1, повзуна 2 і важеля 3. Пружний зв'язок q_c між рухомою та нерухоною платформами реалізовано за допомогою пружини стиснення встановленої між повзунком 2 на рухомій платформі 1 та нерухоною платформою 0 (рис. 3, в).

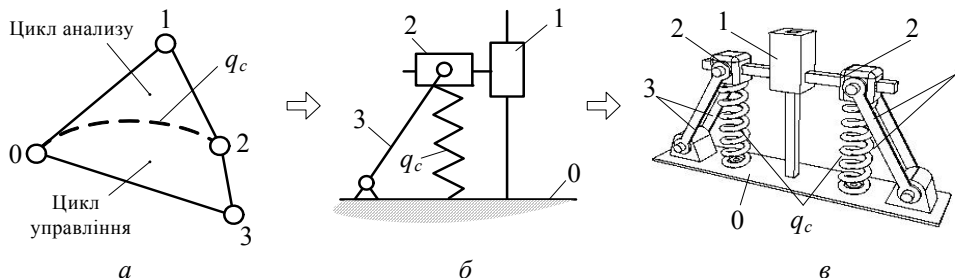


Рис. 3. Формування конструкції пасивного пружного пристрою з розширеними функціональними можливостями: модель у вигляді графа (а); кінематична схема (б); пристрій (в)

Слід зазначити, що модель пристрою у вигляді графа (рис. 3, а) відображає, обумовлену як основне з положень роботоспроможності пристрою, наявність в його структурі двох циклів зі спільним ребром q_c . Однак більш детальна конструктивна проробка цього пристрою показала, що він є не дуже вдалим як з конструктивних, так і технологічних міркувань. Особливо це стосується розміщення направляючих повзунів у вигляді консоли на рухомій платформі, що не дозволяє забезпечити потрібну жорсткість і міцність конструкції, а також має досить складну технологію виготовлення та складання елементів. Тому проведено оптимізацію моделі пристрою у вигляді графа, яка полягає у визначенні вагових коефіцієнтів ребер за критерієм — оптимальна бажана взаємодія між ланками пристрою та обумовленою цим зміною порядку розташування полюсів (ланок пристрою) при дотриманні основного положення про наявність двох циклів зі спільним ребром q_c . В результаті проведеної оптимізації отримано нову модель пристрою у вигляді графа, яка обумовила відповідну кінематичну схему (рис. 4).

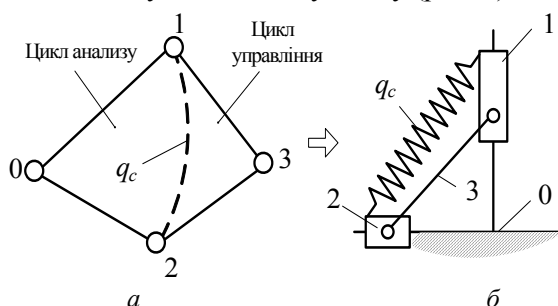


Рис. 4. Формування конструкції ПДПК: модель у вигляді графа (а); кінематична схема (б)

Отримана кінематична схема після конструкторської розробки реалізована у пристрої, який і являє собою запропонований ПДПК (рис. 5).

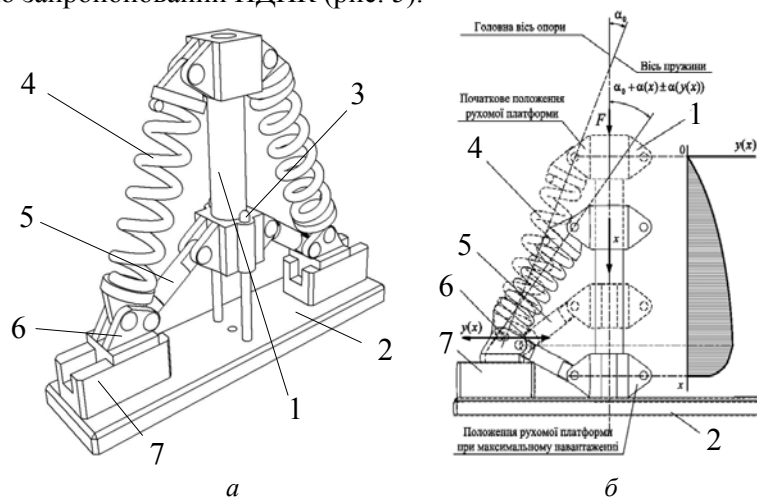


Рис. 5. Конструкція ПДПК: 3D модель (а), розрахункова схема (б)

Запропонований ПДПК містить рухому 1 (для закріплення власної маси ПДПК) і нерухому 2 (для закріплення ПДПК на об'єкті) платформи, які переміщуються одна відносно одної вздовж напрямних 3, між якими для утворення пружного зв'язку встановлено циліндричні пружини стискання 4 (рис. 5, а). Осі пружин при відсутності навантаження складають з головною віссю опори деякий початковий кут (рис. 5, б). Управління пружними характеристиками запропонованого ПДПК здійснюється завдяки механічній системі управління у вигляді шарнірно – важільного механізму. Вона складається з важеля 5, який одним кінцем контактує з рухомою платформою 1, а іншим з повзуном 6, на якому, у свою чергу, закріплений один з кінців

пружини стискання 4, інший кінець якої контактує з рухомою платформою 1. Сам повзун переміщується вздовж напрямної 7, закріпленої на нерухомій платформі 2 і обумовлює реалізацію необхідного знакозмінного переміщення одного з кінців пружини для зміни кута нахилу її осі відносно головної осі пристрою. У загальному вигляді зміна кута нахилу осі пружини описується виразом

$$\alpha_{\Sigma}(x) = \alpha_0 + \alpha(x) \pm \alpha(y), \quad (3)$$

де $\alpha(x)$ — геометрична зміна кута між головною віссю опори і осями пружин стискання 4, пов'язана з їх початковою орієнтацією і їх деформацією x в проекції на головну вісь пристрою;

$\alpha(y)$ — знакозмінний кут між головною віссю опори і осями пружин стискання 4, зміна якого пов'язана з напрямком і величиною переміщення $y(x)$ кінця пружини стискання, закріпленої на повзуні 6.

Слід зазначити, що загальна функція $\alpha(y)$ у виразі (3), яка обумовлює знакозмінний кут, є функцією багатьох змінних, серед яких геометричні параметри пристрою і механічної системи управління займають одне з перших місць. Це дає підставу стверджувати, що наведена конструкція має можливість відтворення цільової пружної характеристики, яка обумовлює ефективне динамічне погашення коливань.

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлено: оптимальні пружні характеристики ПДПК, які обумовлюють ефективне погашення коливання, є нелінійними і описуються степеневими виразами з показниками степеня не вище чотирьох; оптимальні пружні характеристики реалізуються активними ПДПК; пружні характеристики, дуже близькі до оптимальних з точки зору ефективного динамічного погашення коливань, відтворюються деякими пасивними віброізолюючими пристроями з механічним зворотним зв'язком, що значно простіші і дешевші за активні системи. Саме тому деякі з них можуть бути застосовані як пружні динамічні погашувачі коливань.

Література

1. Карамышкин, В.В. Динамическое гашение колебаний / В.В. Карамышкин. — Л.: Машиностроение, 1988. — 105 с.
2. Ильинский, В.С. Защита аппаратов от динамических воздействий / В.С. Ильинский. — М.: Энергия, 1970. — 320 с.
3. Корнев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения / Б.Г. Корнев, Л.М. Резников — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 302 с.
4. Сидоренко, И.И. Управление жесткостью механических систем при помощи виброизолирующих устройств с обратной связью / И.И. Сидоренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одеса, 2005 — Вып. 2(24). — С. 30 — 35.
5. Сидоренко, И.И. Виброизолирующие устройства с элементами активных систем / И.И. Сидоренко // Проблемы техники: Вісн. Одес. держ. мор. ун-ту. — Одеса: Диол — Принт, 2007. — № 3. — С. 43 — 48.
6. Сидоренко, И. Пассивные виброизолирующие устройства с элементами активных систем: монография / И. Сидоренко — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., 2011. — 296 с.

References

1. Karamyshkin, V.V. Dinamicheskoe gashenie kolebaniy. [Dynamic vibration damping] / V.V. Karamyshkin. — Leningrad, 1988. — 105 pp.
2. Il'yinskiy, V.S. Zashchita apparatov ot dinamicheskikh vozdeystviy [Protection of devices from dynamic effects] / V.S. Il'yinskiy — Moscow, 1970. — 320 pp.
3. Korenev, B.G. Dinamicheskie gasiteli kolebaniy: Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya [Dynamic dampers: Theory and Technical Applications] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov — Moscow, 1988. — 302 pp.

4. Sidorenko, I.I. Upravlenie zheskost'yu mekhanicheskikh sistem pri pomoshchi vibroizoliruyushchikh ustroystv s obratnoy svyaz'yu. [Stiffness control of mechanical systems with anti-vibration feedback devices] / I.I. Sidorenko / Trudy Odes. Politekhn. Univ. [Proc. of the Odessa Polytech. Univ.] — Odesa. — Issue 2(24). — 2005. — pp. 30 — 35.
5. Sidorenko, I.I. Vibroizoliruyushchie ustroystva s elementami aktivnykh sistem [Anti-vibration devices with elements of active systems] / I.I. Sidorenko / Problemy tekhniki: Visn. Odes. derzh. mor. un-tu. [Engineering Problems: Herald of the Odessa State Marine University] — Odesa, 2007. — # 3. — pp. 43 — 48.
6. Sidorenko, I.I. Passivnye vibroizoliruyushchie ustroystva s elementami aktivnykh sistem: Monografiya [Passive vibration isolation device with elements of active systems: Monograph] / I.I. Sidorenko — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., 2011. — 296 pp.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Гутиря С.С.

Надійшла до редакції 14 вересня 2012 р.