

УДК 681.3

DOI 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-77-84

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПОКООРДИНАТНОГО ПОШУКУ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПОЗИЦІЇ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

*М. О. Слабінога, Н. Б. Клочко, О. С. Криницький, Ю. М. Кучірка*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ,  
вул. Карпатська, 15, mslabinoha@gmail.com*

Робота присвячена дослідженню ефективності методів покоординатного пошуку для вирішення задачі знаходження позиції сонячних панелей, в якій досягається найбільша потужність продукованого струму. Проаналізовано існуючі рішення на ринку систем слідкування за сонцем (сонячних трекерів), наведено переваги та недоліки таких систем в порівнянні з фіксованим кріпленням панелей. Запропоновано удосконалити розроблене авторами апаратне та програмне забезпечення з дослідження ефективності функціонування сонячних панелей, висвітлене в попередніх роботах, інтегрувавши в систему програмну реалізацію алгоритму покоординатного пошуку максимуму потужності сонячних панелей. З цією метою, було досліджено ефективність за трьома показниками трьох алгоритмів покоординатного пошуку максимуму, а саме - методу покоординатного підйому, методу Хука-Дживса та методу Розенброка. Експерименти проводилися на даних, отриманих як експериментальним шляхом з допомогою лабораторного стенду дослідження ефективності сонячних панелей в залежності від кута падіння сонячних променів, так і згенерованих математичною моделлю залежності ефективності сонячної панелі від кута випромінювання, описаною в попередніх роботах. Проаналізовано результати експериментів, які показали принципову відмінність роботи алгоритмів покоординатного пошуку на математичній моделі та експериментальних даних. Обґрунтовано основні отримані показники ефективності алгоритмів, виходячи з метеорологічних умов, в яких здійснювались вимірювання для формування експериментальних даних. Зроблено висновки щодо ефективності використання даних методів покоординатного пошуку для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячних панелей. Наведено подальші перспективи досліджень за даною темою та можливості використання методів покоординатного пошуку в програмному забезпеченні сонячних панелей з двохісною орієнтацією за позицією Сонця.

**Ключові слова:** сонячна енергетика, сонячні трекери, позиція сонячних панелей, метеорологічні умови, програмне забезпечення, покоординатний пошук.

Работа посвящена исследованию эффективности методов покоординатного поиска для решения задачи нахождения позиции солнечных панелей, в которой достигается максимальная мощность производимого тока. Проанализированы существующие решения на рынке систем слежения за солнцем (солнечных трекеров), Приведены преимущества и недостатки таких систем по сравнению с фиксированным креплением панелей. Предложено усовершенствовать разработанное авторами аппаратное и программное обеспечение для исследования эффективности функционирования солнечных панелей, приведенное в предыдущих работах, интегрировав в систему программную реализацию алгоритма покоординатного поиска максимума мощности солнечных панелей. С этой целью, была исследована эффективность по трем показателям трех алгоритмов покоординатного поиска максимума, а именно - метода покоординатного подъема, метода Хука-Дживса и метода Розенброка. Эксперименты проводились на данных, полученных как экспериментальным путем с помощью лабораторного стенда исследования эффективности солнечных панелей зависимости от угла падения солнечных лучей, так и сгенерированных математической моделью зависимости эффективности солнечной панели от угла излучения, описанной в предыдущих работах. Проанализированы результаты экспериментов, которые показали принципиальное отличие работы алгоритмов покоординатного поиска на математической модели и экспериментальных данных. Обоснованы основные показатели эффективности алгоритмов, исходя из метеорологических условий, в которых осуществлялось измерение для формирования экспериментальных данных. Сделаны выводы по поводу эффективности использования данных методов покоординатного поиска для решения задачи поиска оптимальной позиции солнечных панелей. Приведены дальнейшие перспективы исследований по данной теме и возможности использования методов

покоординатного пошука в програмному забезпеченні сонячних панелей з двухосною орієнтацією по позиції Сонця.

**Ключеві слова:** сонячна енергетика, сонячні трекери, позиція сонячних панелей, метеорологічні умови, програмне забезпечення, покоординатний пошук.

The work is devoted to the investigation of the effectiveness of the coordinate search methods for solving the problem of finding the position of the solar panels, in which the greatest power of the produced current is achieved. The existing solutions in the market of sun surveillance systems (solar trackers) are analyzed. The advantages and disadvantages of such systems are presented in comparison with fixed panels. It is proposed to improve the hardware and software for research of the solar panels efficiency, developed by the authors and highlighted in the previous works, by integrating the program realization of the algorithm of coordinate search of the maximum power of solar panels into the existing. For this purpose, the efficiency of three algorithms for coordinate search of the maximum, namely, the method of coordinate ascending, the Huck-Jeeves method and the Rosenbrock method, was studied in three parameters. Experiments were carried out on data obtained both experimentally using the lab stand for solar panel efficiency research, and by generation using mathematical model of the solar panel efficiency dependence on the angle of radiation, described in previous works. The results of experiments are analyzed, which showed a fundamental difference between the work of coordinatewise search algorithms on a mathematical model and experimental data. The main indicators of the efficiency of algorithms are substantiated on the basis of the meteorological conditions in which the measurement was carried out for the formation of experimental data. Conclusions are drawn regarding the efficiency of using these coordinate-based search methods for solving the problem of finding the optimal position of solar panels. Further prospects for research on this topic and the possibility of using coordinate-wise search methods in software of solar panels with a biaxial orientation on the position of the Sun are given.

**Keywords:** solar energy, solar trackers, position of solar panels, meteorological conditions, software, coordinate search.

На даний момент, сонячні електростанції є одним із найперспективніших напрямів відновлюваної енергетики. Як правило, для промислових сонячних електростанцій застосовується монтаж сонячних панелей під певним фіксованим кутом. При цьому, ефективність сонячних панелей значним чином залежить від кута падіння сонячних променів [1-2]. Тому, альтернативним варіантом для сонячних електростанцій є монтаж сонячних панелей на рухомих одновісних чи двовісних кріпленнях, які керуються системою стеження за сонцем (сонячним трекером). Хоча вартість таких кріплень набагато вища, ніж нерухомих, значне зростання ефективності установки [3] знижує період її окупності (Рис. 1).

Трьома основними способами керування рухомими сонячними панелями є [3]:

- керування за фотодіодом;
- керування за азимутальним кутом та кутом нахилу;
- керування за математичним розрахунком позиції Сонця.

Кожен із цих підходів має свої переваги і недоліки. Наприклад, керування позицією сонячних панелей за показниками освітленості, що вимірюються світлодіодами, встановленими на панель, передбачає періодичне їх очищення та обслуговування, в той час як розрахунок позиції за математичними формулами втрачає свою ефективність у випадку хмарної погоди або наявності природних та штучних перешкод довкола сонячних панелей (дерев, будинків, тощо).

Авторами в публікації [4] було запропоновано апаратне та програмне забезпечення для дослідження зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів, яке дозволяє отримати дані щодо ефективності сонячної панелі при різних азимутах та кутах нахилу до горизонту. Програмне забезпечення формує образ, приклад графічного представлення якого подано на рисунку 2.

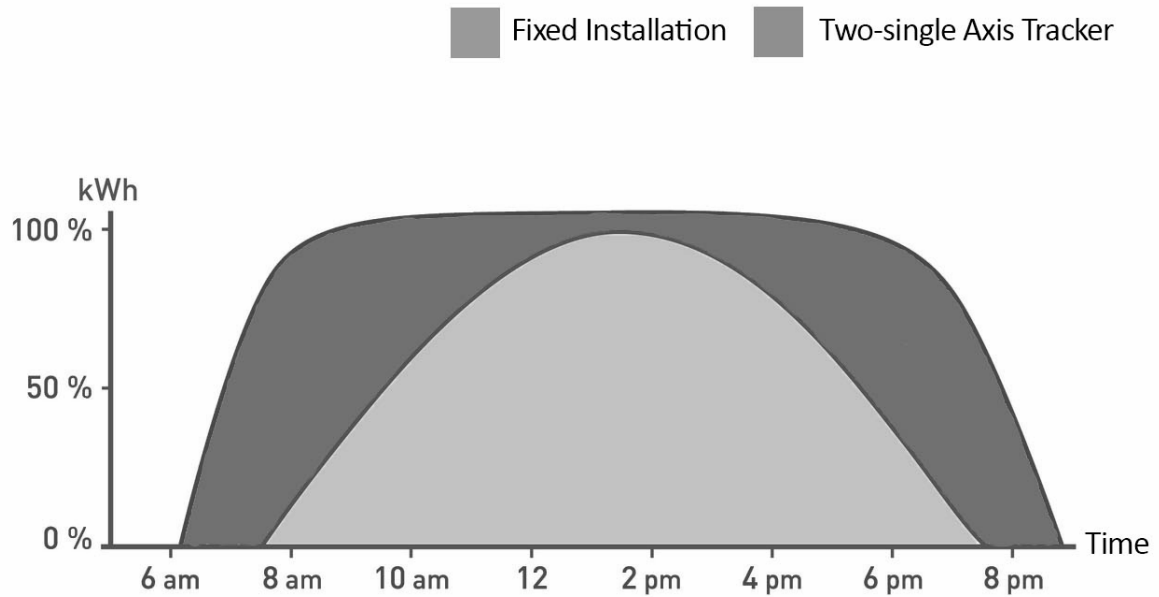


Рисунок 1 - Порівняння ефективності роботи фіксованих сонячних панелей (світло-сіра зона) та сонячних панелей, що рухомі по двох осях (темно-сіра зона).

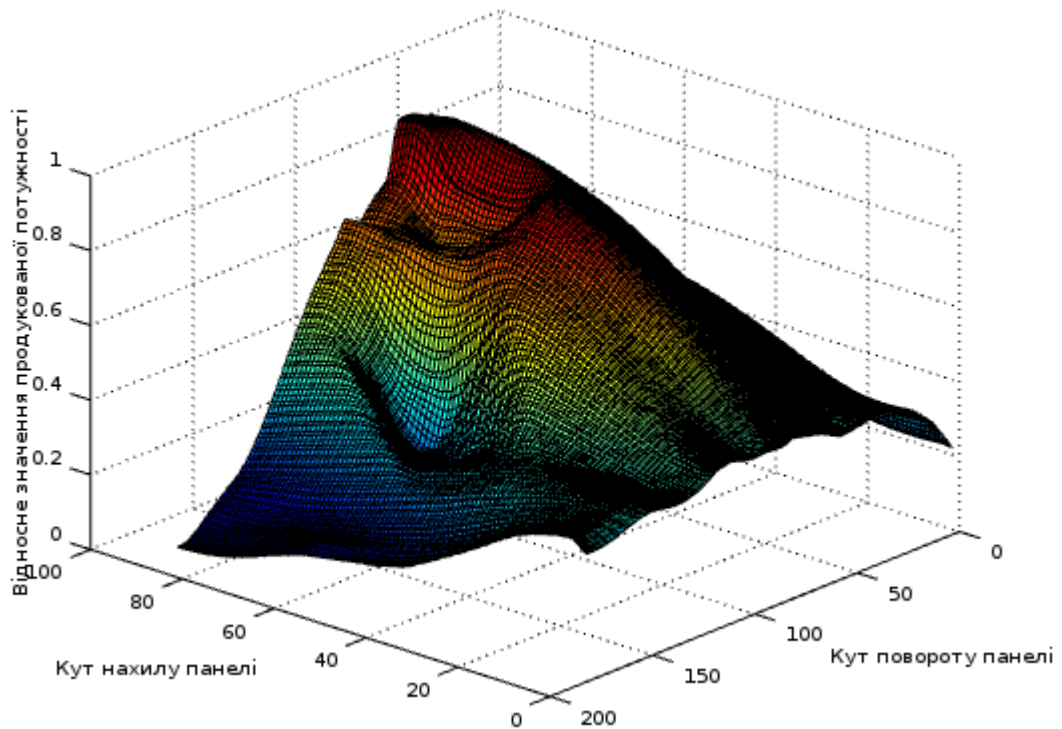


Рисунок 2 - Приклад графічного представлення образу даних про ефективність сонячних панелей в залежності від кута нахилу та азимуту .

Проведення вимірювань та побудова образу займає близько 10 хвилин, тому проведення повного вимірювання та пошук позиції панелей, що дає максимальну ефективність, є неефективним для використання в системі позиціонування панелей в реальному часі. Однак, сама система може бути використана для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції, якщо на базі розробленого програмного та апаратного забезпечення буде імплементовано оптимізаційні методи покоординатного пошуку. Такі методи дозволяють ефективно використовувати результати вимірювань для пошуку оптимальної з точки зору потужності позиції сонячних панелей в реальному часі.

З допомогою розробленого програмного забезпечення, розробленого авторами та описаного в попередніх роботах [5], на основі математичної моделі було сформовано 4 тестові образи. На основі 4 змодельованих образів, та 6 експериментальних образів, сформованих в роботі [4], було проведено порівняння ефективності методів покоординатного пошуку максимуму при знаходженні позиції сонячної панелі з максимальною потужністю продукованого струму, при початку пошуку з довільної точки. Для цього, на базі мови програмування середовища GNU Octave було розроблено імплементації методів покоординатного підйому, Хука-Дживса та

Розенброка у вигляді функцій, що приймають матрицю значень 180 на 90 і повертають наступні дані:

1) позицію максимуму, що була знайдена методом;

2) кількість кроків повороту панелі, за яку був знайдений максимум.

Оскільки кожному з методів притаманна наявність похибок через вразливість до знаходження локальних максимумів замість глобальних, при проведенні порівняльного дослідження, було поставлено наступні умови:

1) кожен з методів опрацьовував один образ 1000 разів, починаючи пошук максимуму із випадкової позиції;

2) після завершення роботи методу, значення знайденого максимуму порівнювалося з заздалегідь відомим правильним значенням, і, якщо вони не співпадали, зараховувався промах;

3) при зарахуванні промаху, обчислювалася евклідова відстань від точки справжнього максимуму до точки, яку метод встановив як максимум;

4) після завершення 1000 спроб, відбувалося обчислення середньої кількості кроків для досягнення максимуму, відсотка промахів у загальній кількості експериментів та середнє значення евклідової відстані від справжнього максимуму до помилково знайденого тестованим методом.

Результати експерименту подані в таблицях 1-3.

**Таблиця 1 – Використання методу покоординатного підйому для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.**

Образ/Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань від фактичного результату до дійсного максимуму, градуси	Середня кількість кроків для досягнення максимуму (1 крок - поворот на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.081	0.36224	1877.6
Експериментальний образ 2	0.193	0.43156	1817.9
Експериментальний образ 3	0.576	18.575	1913.2

Образ/Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань від фактичного результату до дійсного максимуму, градуси	Середня кількість кроків для досягнення максимуму (1 крок - поворот на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 4	0	0	1568.4
Експериментальний образ 5	0.852	3.3057	1499.5
Експериментальний образ 6	0	0	1437.7
Модельований образ 1	0	0	1557.3
Модельований образ 2	0	0	1438.7
Модельований образ 3	0	0	1453
Модельований образ 4	0	0	1432.9

**Таблиця 2 – Використання методу Хука-Дживса для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.**

Образ/Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань від фактичного результату до дійсного максимуму, градуси	Середня кількість кроків для досягнення максимуму (1 крок - поворот на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.075	0.33541	1952.1
Експериментальний образ 2	0.211	0.47181	1868
Експериментальний образ 3	0.558	17.995	1968.2
Експериментальний образ 4	0	0	1637.2
Експериментальний образ 5	0.832	3.3163	1496.3
Експериментальний образ 6	0	0	1477.9

Образ/Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань від фактичного результату до дійсного максимуму, градуси	Середня кількість кроків для досягнення максимуму (1 крок - поворот на 1 градус по будь-якій осі)
Модельований образ 1	0	0	1480.1
Модельований образ 2	0	0	1485.7
Модельований образ 3	0	0	1495.4
Модельований образ 4	0	0	1480.7

**Таблиця 3 – Використання методу Розенброка для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.**

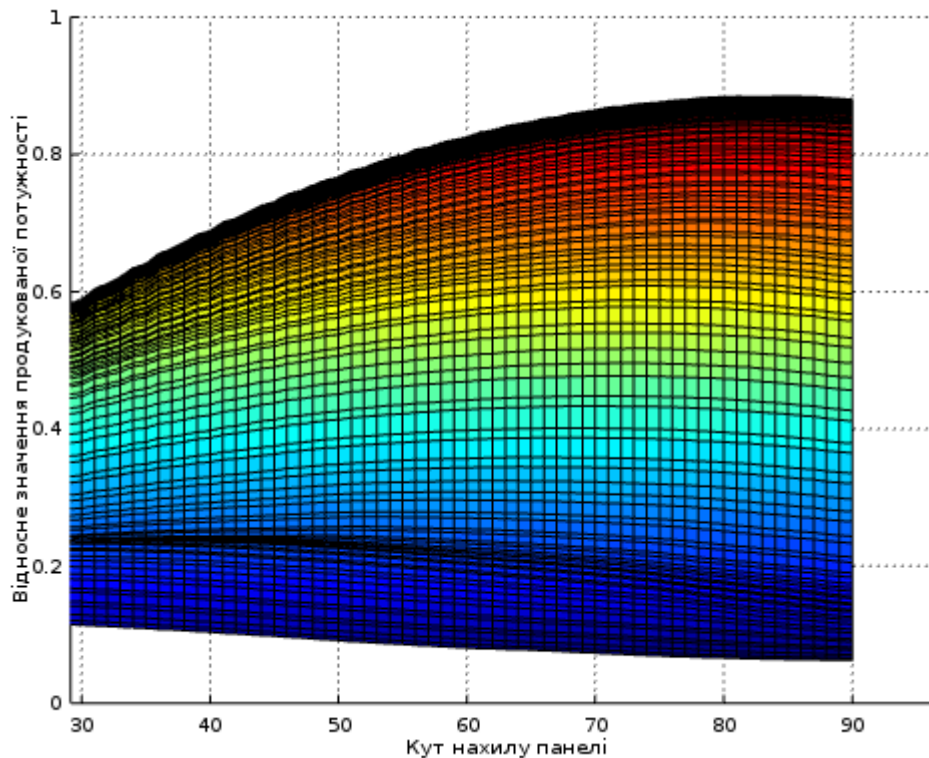
Образ/Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань від фактичного результату до дійсного максимуму, градуси	Середня кількість кроків для досягнення максимуму (1 крок - поворот на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.074	0.33094	1876.1
Експериментальний образ 2	0.218	0.48746	1805.9
Експериментальний образ 3	0.556	17.93	1903.1
Експериментальний образ 4	0	0	1595.5
Експериментальний образ 5	0.833	3.3067	1542.6
Експериментальний образ 6	0	0	1436.6
Модельований образ 1	0	0	1393
Модельований образ 2	0	0	1446.4
Модельований образ 3	0	0	1453.7
Модельований образ 4	0	0	1433

Перш за все, слід зазначити, що на модельованих образах, всі алгоритми визначили глобальні максимуми безпомилково, затративши на це меншу кількість кроків, порівняно з пошуком максимуму на експериментальних образах.

Щодо експериментальних образів, то методи безпомилково знайшли максимум у випадку 4 і 6 образів. Невеликий відсоток промахів спостерігається на образі 1 та 2. Ймовірно, безпомилкова класифікація глобального максимуму на образі 4 та класифікація з відносно низьким відсотком помилок на образі 2, які був отримані у хмарну погоду, пов'язана зі специфікою алгоритмів

пошуку даними методами на поверхні, де чітко прослідковувалися коливання по одній з осей при малих змінах значень по іншій[4].

Найбільша кількість помилок була зафіксована на образах 3 та 5. Щодо образу 3, слід зазначити, що через хмарну погоду даний образ відрізняється неправильними формами та локальними максимумами. При цьому, образ 5 за формою нагадує модельовані образи, однак методи при визначенні максимуму на ньому помилялися найчастіше. При зближенні (Рис. 3), однак, видно, що даний образ не має гладкої поверхні, як модельовані образи, а містить велику кількість локальних максимумів з неглибокими локальними мінімумами між ними.



**Рисунок 3 - Фрагмент поверхні образу 5 на зближенні.**

При цьому, слід зазначити, що при порівнянні результатів методів у пошуку максимуму на образах 3 і 5, образ 5 хоч і має вищий відсоток промахів (приблизно 0,84 проти 0,56 відповідно), однак середня евклідова відстань між знайденим локальним максимумом та глобальним максимумом при пошуку на образі 5 становила близько 3,3 градусів проти 18 на образі 5. Це значить, що попри непопадання в точний глобальний максимум, методи

дозволяли знайти значення, яке локально знаходилось близько до нього.

Щодо порівняльної характеристики роботи методів на одному образі, то кількість кроків, відсоток промахів та відстань від знайденого максимуму до глобального відрізнялась на дуже малі значення, тому немає змісту говорити про кращу ефективність того чи іншого методу із трьох представлених у порівнянні для вирішення даної задачі.

Таким чином, можна зробити висновок, що незважаючи на безпомилкову роботу методів покоординатного пошуку максимуму на модельованих образах, на використання даних методів для експериментальних даних накладаються деякі обмеження, пов'язані з виникненням локальних максимумів у образах, отриманих в умовах хмарної погоди або підвищеної вологості.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф83.

### Література

1. D. King, W. Boyson, and B. Hansen, "Improved Accuracy for Low-Cost Solar Irradiance Sensors," 2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion, Vienna, 1998, pp. 2001-2004.

2. D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, «Photovoltaic Array Performance Model», SANDIA REPORT SAND2004-3535 Unlimited Release Printed December 2004.

3. How Efficient Are Solar Trackers? [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://solarflexrack.com/how-efficient-are-solar-trackers-2/>

4. Розроблення програмного забезпечення для дослідження зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів / М. О. Слабінога, Н. Б. Ключко, С. Р. Винничук, С. Р. Сапа // *Методи та прилади контролю якості*. – 2018. – № 2. – С. 113-119.

5. Моделирование зависимости мощности солнечных панелей от угла падения лучей / М. О. Слабінога, Ю. М. Кучірка, О. С. Криницький, Н. М. Юрків // *Методи та прилади контролю якості*. – 2018. – № 2. – С. 18-24.

### References

1. D. King, W. Boyson, and B. Hansen, "Improved Accuracy for Low-Cost Solar Irradiance Sensors," 2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion, Vienna, 1998, pp. 2001-2004.

2. D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, «Photovoltaic Array Performance Model», SANDIA REPORT SAND2004-3535 Unlimited Release Printed December 2004.

3. How Efficient Are Solar Trackers? [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://solarflexrack.com/how-efficient-are-solar-trackers-2/>

4. Rozroblennya programnogo zabezpechennya dlya doslidzhennya zmini potuzhnosti sonyachnih panelej vid kuta padinnya promeniv / М. О. Slabinoga, N. B. Klochko, S. R. Vinnichuk, S. R. Sapa // *Metodi ta priladi kontrolyu yakosti*. – 2018. – № 2. – S. 113-119.

5. Modelyuvannya zalezhnosti potuzhnosti sonyachnih panelej vid kuta padinnya promeniv / М. О. Slabinoga, Yu. M. Kuchirka, O. S. Krinickij, N. M. Yurkiv // *Metodi ta priladi kontrolyu yakosti*. – 2018. – № 2. – S. 18-24.