

## **МЕТОД ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ РУХУ БЕЗПІЛОТНОЇ ЗБИРАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

**С. А. ШВОРОВ**, доктор технічних наук, професор

**Д. С. КОМАРЧУК**, кандидат технічних наук

**В. Є. ЛУКІН**, кандидат педагогічних наук

**Д. В. ЧИРЧЕНКО**, інженер

*Національний університет біоресурсів*

*і природокористування України*

*E-mail: sosdok@i.ua*

**Анотація.** Проаналізовані сучасні тенденції щодо застосування безпілотних засобів у сільському господарстві західних держав. Розглянуті перспективні інноваційні технології та метод планування маршрутів безпілотної збиральної техніки в залежності від наявності врожаю та перешкод на шляху їх руху. Сформульовані основні задачі щодо комплексного застосування безпілотних літальних апаратів та безпілотної збиральної техніки для ефективного планування та збирання врожаю.

**Ключові слова:** *технологія, безпілотні літальні апарати, точне землеробство, планування маршрутів, керування рухом, безпілотна збиральна техніка*

**Актуальність.** Нині все більше уваги приділяється «точному землеробству», що забезпечує максимальну продуктивність сільсько-господарських робіт з урахуванням різного стану рослин та середовища їх вирощування. При цьому найбільш перспективним є комплексне використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотної збиральної техніки (БЗТ) в залежності від наявності врожаю та перешкод на кожній ділянці поля.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результати проведеного аналізу наукових праць [1-3] показують, що за кордоном активно ведуться роботи щодо створення і впровадження «безпілотних» тракторів та комбайнів для сільськогосподарського виробництва. Наприклад, фінська компанія «Valtra» представила концептуальний трактор RoboTrac, який управляється за допомогою GPS-навігаторів і інтернету. Швейцарська фірма "Leica Geosystems" підписала довготерміновий контракт з китайським виробником спецтехніки УТО на поставку свого обладнання для безпілотного управління тракторами. За останні роки багато компаній представляли свої концепції і рішення подібних завдань, але витрати на таку техніку були нерентабельними. Проте, ситуація кардинально змінилася, коли фермери багатьох штатів

США почали зазнавати колосальних збитків через відсутність навчених і добре підготовлених механізаторів. Щорічно окремі напрями сільського господарства США втрачають до 30 відсотків свого врожаю через неможливість вчасно провести його збирання тому, що для цього знадобився б 24-годинний робочий день, чого фізично не витримає людина. Як відомо, компанія Case IH вже розробила спеціальні автоматизовані безпілотні комбайни, що забезпечують виконання робіт у нічний час та зменшення експлуатаційних витрат в умовах нестабільного землеробства. Компанія «Джон Дір» (США), а також німецькі виробники випускають експериментальні безпілотні модифікації тракторів і комбайнів, які успішно експлуатуються на великих сільськогосподарських підприємствах США і Європи. Компанія "АвтоКрАЗ" і запорізька інжинірингова компанія "Інфоком Лтд" завершили роботу над створенням автопілоту Pilotdrive, який на основі інформації від комплексу спеціальних датчиків (тепловізор, відеокамера з охопленням 360 градусів, передній і задній радар для виявлення перешкод, далекомір, ємнісний датчик присутності людини в радіусі 18 метрів) дозволяє легко орієнтуватися в дорозі. При цьому в сучасній літературі не достатньо повно приділяється уваги комплексному застосуванню безпілотних наземних та повітряних засобів для автоматизації процесів планування та керування БЗТ.

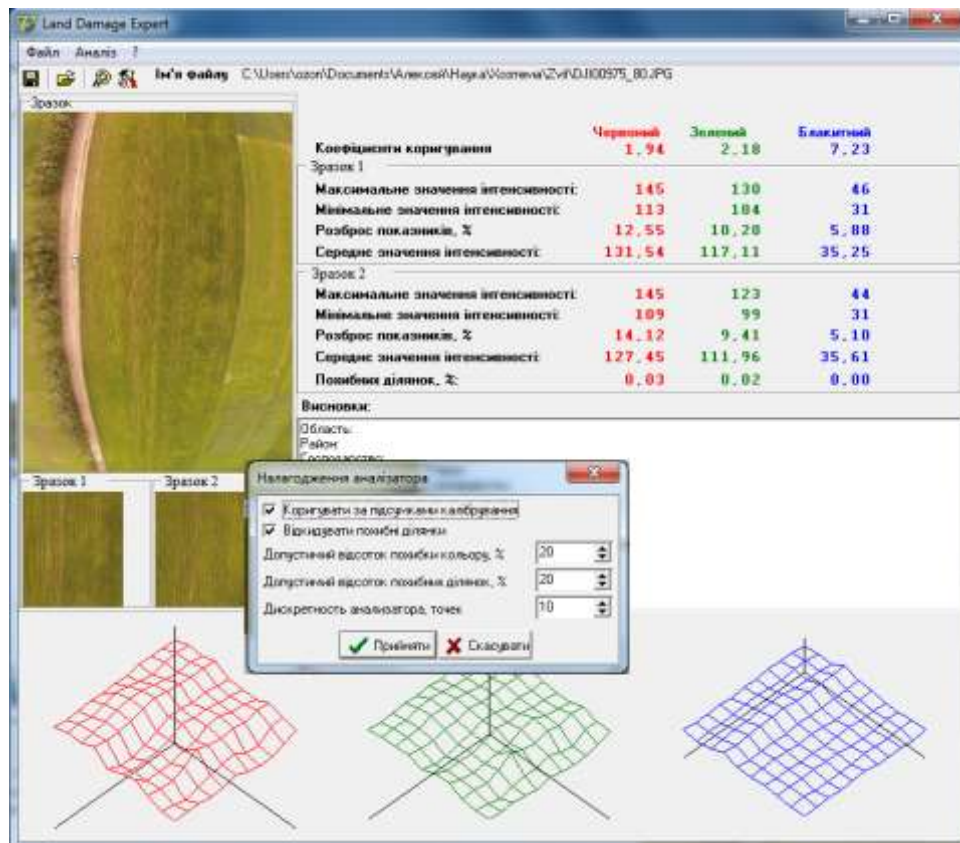
**Мета дослідження** – розробка методу планування маршрутів руху безпіотної збиральної техніки в залежності від наявності врожаю та перешкод на ділянках поля, визначених за допомогою БПЛА.

**Матеріали та методи дослідження.** Процес планування змісту та часу виконання польових робіт поділяється на декілька етапів, а саме: формування електронної карти місцевості та уточнення стану врожаю на кожній ділянці за допомогою безпілотних літальних апаратів, а також визначення компромісно-оптимальних маршрутів руху збиральної техніки на полях з перешкодами та складними геометричними формами. Як правило, оцінка стану рослинності за допомогою зйомки БПЛА визначається на основі використання нормалізованого вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Цей індекс розраховується як різниця значень відображення в ближній інфрачервоній і червоній областях спектру, поділена на їх суму [4-7]. При цьому використовується спеціальна NIR-модифікована камера, що значно збільшує вартість зйомки порівняно зі звичайною фотоапаратурою.

Як показують результати експериментальних досліджень, звичайні цифрові фотокамери можна ефективно використовувати за програмування врожаю та визначення різних перешкод на шляху руху БЗТ на кожній ділянці поля. Після проведення фотозйомки на електронній карті поля на основі статистичної обробки RGB-сигналів визначається декілька контрастних за оптичними характеристиками зон (ділянок). Для кожної з цих зон експериментально розраховуються контрольні обсяги врожаю, які використовуються для навчання нейронної мережі. Таким чином, на основі статистичної обробки спектральних характеристик цифрових знімків кожної ділянки місцевості та за допомогою апарату

нейронних мереж визначаються обсяги врожаю на шляху руху безпілотних комбайнів, що забезпечує оперативне прийняття рішень для розподілу, планування маршрутів та керування рухом збиральної техніки за мінімальних вартісних (порівняно з космічними зйомками) витрат.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для обробки графічних даних за результатами фотозйомки з БПЛА було використане спеціальне програмне забезпечення виробництва НУБіП LDE - Land damage expert, інтерфейс та блок налагодження якого наведені на рис. 1.



**Рис. 1. Інтерфейс та блок налагодження програми Land damage expert**

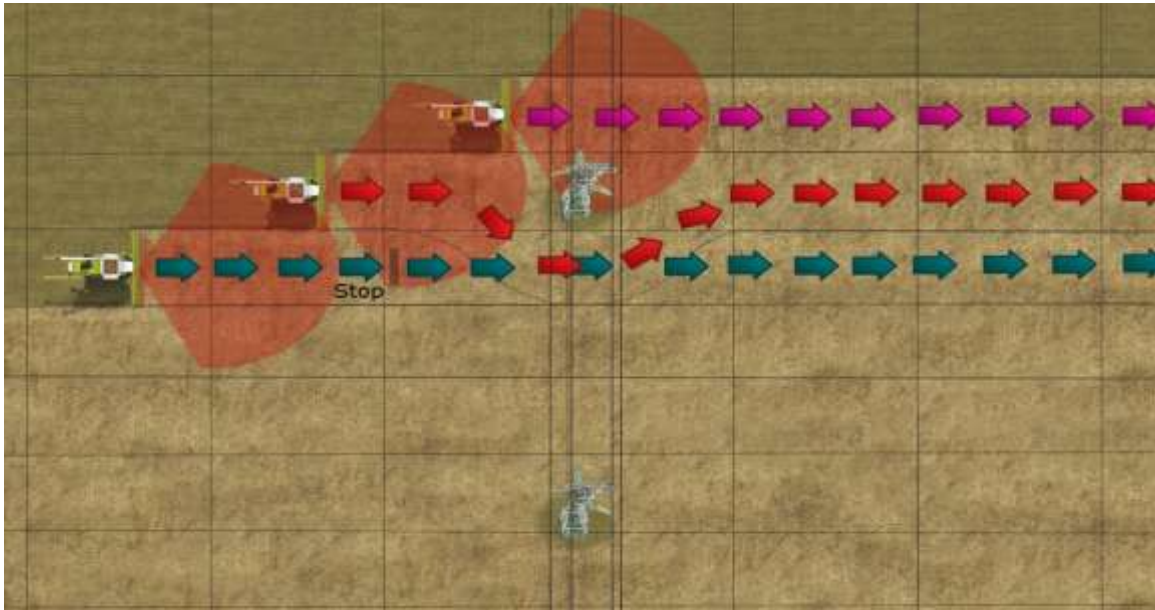
Програма LDE дозволяє за допомогою маніпулятора (миші) на фотографії виділяти 2 дослідні ділянки, для яких проводиться статистична обробка графічних даних. Оскільки стандартний формат Jpeg визначає значення RGB не для кожного конкретного пікселя, а для ділянок з однаковими параметрами, програма LDE перетворює дані із формату Jpeg в формат BMP, в якому значення яскравості складових адитивної моделі кольору утворення визначаються для кожного пікселя.

Програма має можливість визначення координати перешкод на електронній карті місцевості, значення RGB яких відрізняються від середнього на відповідний відсоток, що враховується за налагодження програми (рис. 1).

Для планування руху БЗТ відомою інформацією є координати площі, на якій планується збирання врожаю, початкове місце

знаходження кожної БЗТ та кінцеві точки їх маршруту, координати перешкод та ділянок без врожаю, що отримані за допомогою БПЛА та оброблені програмним забезпеченням Land damage expert.

Необхідно знайти такі компромісно-оптимальні маршрути руху БЗТ, за яких забезпечується: а) мінімальний шлях руху БЗТ; б) об'їзд стаціонарних перешкод; в) об'їзд ділянок без біомаси (врожаю). Тобто, як показано на рис. 2, задача зводиться до пошуку компромісно-оптимальних траєкторій переміщення БЗТ з урахуванням мінімальної довжини маршруту, об'їзду перешкод та ділянок без біомаси.



**Рис. 2. Схема переміщення збиральної техніки полем**

Відправна задача приводиться до дискретного вигляду. Для цього область простору станів, що нас цікавить, накривається Q-ю мережею  $L^1 \times L^2 \times \dots \times L^Q$ . При цьому вважається, що БЗТ може переміщуватися тільки з одного вузла цієї мережі до іншого.

Задача синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм оптимальності за нелінійною схемою компромісів [8]. При цьому для визначення оптимального шляху, з граничною умовою  $F(0, S) = 0$ , в кожному  $\tau$ -у допустиму точку за координатою X та за координатою Y  $j$ -го рівня на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана:

$$F(j, \tau) = \min_{i \in I_{j-1}} \Delta F_{j-1, i}^{j, \tau} + F(j-1, i) \quad j \in 1, J, \quad (1)$$

де  $j$  – кількість рівнів переходу на мережі по координаті X, Y;

$I_{j-1}$  – кількість допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі;

S – номер початкової точки за координатою X на нульовому рівні мережі;

$F_{j,\tau}$  – сумарні втрати за узагальненим критерієм оптимальності за переходу з початкової точки  $0, s$  в точку  $j, \tau$  мережі;

$\Delta F_{j-1,i}^{j,\tau}$  – прирощення узагальненого критерію за переходу з точки  $j-1, i$  в точку  $j, \tau$  мережі.

В узагальнений критерій якості входять три критерії. Перший критерій кількісно визначає ступінь небезпеки наближення до перешкод (G). Другий – характеризує довжину переходу з точки  $j-1, i$  в точку  $j, m$  мережі  $D_{j-1,i}^{j,m}$ . Третій критерій  $\lambda$  визначає ступінь наближення БЗТ до ділянки без біомаси. Розрахунок першого та третього критеріїв відбувається за допомогою програми Land damage expert.

Довжина шляху БЗТ характеризується довжиною переходу з рівня  $j-1$  за координатою  $Y$  на рівень  $j$ . При цьому вважається, що БЗТ, знаходячись в одній із допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі, може переходити лише в одну з допустимих точок на  $j$ -му рівні.

Довжина переходу БЗТ між рівнями мережі визначається за формулою

$$D_{j-1,i}^{j,m} = \sqrt{x_m - x_i^2 + y_j - y_{j-1}^2}, \quad (2)$$

де  $x_i, y_{j-1}$  – координати БЗТ на  $(j-1)$ -му рівні мережі;

$x_m, y_j$  – координати допустимої точки на  $j$ -му рівні мережі.

Задача синтезу оптимальної траєкторії руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм оптимальності за нелінійною схемою компромісів. При цьому для визначення оптимального шляху в кожену  $m$  допустиму точку за координатами  $x$   $j$ -го рівня та  $y$  на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана:

$$F_{j,m} = \min_{i \in I_{j-1}} \Delta F_{j-1,i}^{j,m} + F_{j-1,i}, \quad j \in 1, J, \quad (3)$$

з граничною умовою  $F_{0,s} = 0$ ,

де  $j$  – кількість рівнів переходу за координатою  $y$  на мережі;

$I_{j-1}$  – кількість допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі;

$s$  – номер початкової точки за координатою  $x$  на нульовому рівні мережі;

$F_{j,m}$  – сумарні втрати за узагальненим критерієм оптимальності за переходу з початкової точки  $0, s$  в точку  $j, m$  мережі;

$\Delta F_{j-1,i}^{j,m}$  – прирощення узагальненого критерію за переходу з точки  $j-1, i$  в точку  $j, m$  мережі.

Структура узагальненого критерію будується у відповідності до методології нелінійної схеми компромісів [8] та визначається виразом:

$$\Delta F_{j-1,i}^{j,m} = \frac{G_{\max}}{G_{\max} - G_{j,m}} + \frac{D_{\max}}{D_{\max} - D_{j-1,i}^{j,m}} + \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\max} - \lambda_{j-1,i}^{j,m}}. \quad (4)$$

В якості оптимальної на рівні  $j$  вибирається та допустима точка даного рівня, якій відповідає мінімум сумарних втрат за узагальненим критерієм оптимальності (4). Розраховані за допомогою даного методу компромісно-оптимальні траєкторії руху передаються в навігаційну апаратуру БЗТ.

**Висновки і перспективи.** Таким чином, запропоновані технологічні основи та метод планування маршрутів руху безпілотної збиральної техніки, в залежності від наявності врожаю та перешкод на шляху руху БЗТ, визначених за допомогою БПЛА, передбачають більш високу оперативність та точність керування БЗТ, а також зменшення витрат пального. Одержані дані з БПЛА дають можливість на основі використання програми Land damage expert оперативно визначити ефективну площу посівів, площу просівів, обсяги врожаю та перешкоди на шляху руху безпілотної збиральної техніки, що забезпечує оптимальне планування збиральної кампанії.

### Список використаних джерел

1. Нагайцев, М. В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний / М. В. Нагайцев, А. М. Сайкин, Д. В. Ендачѳв // Журнал автомобильных инженеров 2012. – №5 (76) – С. 32-39.
2. Перший безпілотний [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
3. КрАЗ – перший «розумний» український автомобіль. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ria.ru/world/20161006/1478677087.html>, <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyi-bezpilotnyi-kraz-pershyi-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>
4. Система автоматического вождения Trimble Autopilot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema\\_avtomaticheskogo\\_vozhdeniya\\_trimble\\_autopilot](http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot).
5. Використання БПЛА для дистанційного зондування посівів під час програмування врожаю / [Лисенко В. П., Опришко О. О., Комарчук Д. С., Пасічник Н. А.] // Науковий вісник НУБіП України. 2016. – Випуск 256. – С. 146-150.
6. Трускавецький, С. Р. Можливості супутникової зйомки в ідентифікації зернових культур харківської області / С. Р. Трускавецький, Л. П. Коляда, О. І. Шерстюк // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. 2013. – Випуск 15. – С. 178-183.
7. Балюк, С. А. Солоха, М. О. Методичні рекомендації щодо стану зрошуваних земель та сільськогосподарських культур на базі аерофотозйомки / С. А. Балюк, М. О. Солоха // Завершені наукові розробки – 2013 [за ред. С. А. Балюка]. – Харків: ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», 2014. – 44 с.
8. Щодо використання бпла для оцінки стану посівів/ [Ачасов А. Б., Ачасова А. О., Титенко Г. В., Селиверстов О. Ю., Седов А. О.] // Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія», 2015. – Випуск 13. – С. 13-18.
9. Підхід до вирішення задачі компромісно-оптимального вибору маршруту руху об'єктів в конфліктному середовищу / С. А. Шворов, А. М. Берназ О. І. Бурчак [та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: Київський університет, 2008. – № 19. – С. 63–71.

## References

1. Nahaitsev, M., Saikyn, A., Endachev D., (2012) «Bespylotnye» avtomobyly – etapy razrabotky i yspytanyi ["Unmanned" cars - stages of development and testing]. Journal of Automotive Engineers, 5(76), 32–39.
2. The first unmanned, KrAZ - the first "smart" Ukrainian automobile. Available at: <https://ria.ru/world/20161006/1478677087.html>, <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyyi-bezpilotnyi-kraz-pershyyi-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>.
3. Automatic driving system Trimble Autopilot. Available at: [http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema\\_avtomaticheskogo\\_vozhdeniya\\_trimble\\_autopilot](http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot).
4. Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., (2016) Vykorystannia BPLA dlia dystantsiinoho zonduvannia posiviv pid chas prohramuvannia vrozhaiu [Using UAV for remote sensing of crops during harvest programming]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 256, 146–150.
5. Truskavetskyi, S., Koliada, L., Sherstiuk, O., (2013) Mozhlyvosti suputnykovoї ziomky v identyfikatsii zernovykh kultur kharkivskoi oblasti [Features satellite imagery to identify crops Kharkiv region]. Herald TSNZ APV Kharkiv region, 15, 178–183.
6. Baliuk, S., Solokha, M., (2014) Metodychni rekomendatsii shchodo stanu zroshuvanykh zemel ta silskohospodarskykh kultur na bazi aerofotoziomky [Guidelines on state land and irrigated crops based on aerial photography]. Kharkov: NSC "ISSAR behalf ON Sokolovsky", 44.
7. Achasov, A., Achasova, A., Tytenko, H., Selyverstov, O., Sedov, A. (2015) Shchodo vykorystannia bpla dlia otsinky stanu posiviv [To use the UAV to assess the condition of crops]. Bulletin of KNU named VN Karazin series "Ecology", 13, 13–18.
8. Shvorov, S., Bernaz, A., Burchak O., (2008) Pidkhid do vyrishennia zadachi kompromisno-optymalnoho vyboru marshrutu rukhu ob'iektiv v konfliktnomu seredovysshchu [The approach to solving the problem of compromise, the optimal route selection of objects in a conflict environment]. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, 19, 63–71.

## МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, В. Е. Лукин, Д. В. Чирченко**

**Аннотация.** Проанализированы современные тенденции применения беспилотных средств в сельском хозяйстве западных государств. Рассмотрены перспективные инновационные технологии и метод планирования маршрутов беспилотной уборочной техники в зависимости от наличия урожая и препятствий на пути их движения. Сформулированы основные задачи по комплексному применению беспилотных летательных аппаратов и беспилотной уборочной техники для эффективного планирования и сбора урожая.

**Ключевые слова:** технология, беспилотные летательные аппараты, точное земледелие, планирование маршрутов, управление движением, беспилотная уборочная техника

## METHOD FOR PLANNING THE ROUTES OF UNMANNED HARVESTING VEHICLES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

S. Shvorov, D. Komarchuk, V. Lukin, D. Chyrchenko

**Abstract.** *The current trends in the use of unmanned vehicles in the agriculture of Western countries are analyzed. Prospective innovative technologies and the method of planning routes for unmanned harvesting equipment are considered depending on the availability of crops and obstacles on their way of travel. The main tasks for the integrated use of unmanned aerial vehicles and unmanned harvesting equipment for effective planning and harvesting are formulated.*

**Keywords:** *technology, unmanned aerial vehicles, precision agriculture, route planning, traffic control, unmanned harvesting equipment*

УДК 504.064.3:631.589

## АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ В ТЕПЛИЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН РОСЛИНИ

**В. М. РЕШЕТЮК**, кандидат технічних наук, доцент  
**Т. І. ЛЕНДЄЛ**, кандидат технічних наук, старший викладач  
**Б. В. КУЛЯК**, аспірант\*

*Національний університет біоресурсів  
і природокористування України  
E-mail: kul10@i.ua*

**Анотація.** *Наведено текстовий опис та блок-схему алгоритму прийняття рішень щодо проведення зрошення огірка за вирощування у тепличних умовах.*

*Метою роботи є розробка алгоритму прийняття рішень для керування системою краплинного зрошення із використанням інформації про біометричний стан рослини.*

*Динаміка водного потоку в рослині на фоні змін параметрів навколишнього середовища визначалась за даними системи вимірювання тургорного тиску в листках рослини в режимі реального часу, чутливим елементом якої було вибрано електростатичний (ємнісний) перетворювач. Даний перетворювач реалізований у вигляді сенсора (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). Виходи напруги від сенсорів подавались на виходи багатоканального А/D-перетворювача*

---

\* Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент В. М. Решетюк

© В. М. Решетюк, Т. І. Лендєл, Б. В. Куляк, 2017