

УДК 631.347:654.94

І.В. БАЙРАК, Г.В. РУДАКОВА, Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО  
Херсонський Національний Технічний Університет

## МЕТОДИ ОБРОБКИ GPS-ДАНИХ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КРУГОВОГО РУХУ ДОЩУВАЛЬНИХ МАШИН

*Розглянуто використання GPS-технологій для контролю параметрів руху об'єктів сільськогосподарського призначення. Проаналізовано конструкційні особливості дощувальної машини «Фрегат» та запропоновано точки для встановлення GPS-датчиків, що дозволять відстежувати переміщення машини та пов'язані з ним параметри. Виявлено проблеми, що виникають при використанні GPS-датчиків в умовах роботи дощувальної машини та запропоновано методи їх розв'язання. Запропоновано метод корекції отриманих з GPS-датчиків даних, що є можливим за рахунок встановлення додаткової точки відстеження на нерухомій опорі, якою є центр обертання конструкції. Наведено приклад розрахунку коригування даних за запропонованими методами. Графічно представлено результати обробки і коригування масиву даних з датчиків, що встановлені на працюючій дощувальній машині. В результаті обробки дані були масштабовані згідно довжини дуг паралелі та меридіану на  $1^\circ$  у географічному розташуванні об'єкту дослідження відносно його центру обертання. Визначено відхилення значень даних, що надаються GPS-датчиками, від реального розташування машини для кожної з координат та загальне відхилення за різницею отриманих довжин трубопроводу. За результатами розрахунку виявлено максимальну амплітуду відхилення наданих GPS-датчиками координат. Результати розрахунку представлено у графічному форматі, на якому можна спостерігати динаміку відхилень у часі. Згідно особливостей переміщення трубопроводу під час роботи дощувальної машини запропоновано встановлення додаткової точки відстеження на трубопроводі, що дозволить отримувати інформацію про кривизну конструкції. Проаналізовано місця можливих відхилень повздовж трубопроводу при роботі машини та виявлено найбільш доцільну для відстеження точку. Запропоновано метод розрахунку кривизни трубопроводу за координатами трьох точок відстеження: точки кінцю трубопроводу, точки центра обертання конструкції та додаткової точки відстеження, що відповідає середині трубопроводу. Наведено приклад розрахунку відхилення додаткової точки відстеження від ідеальної траєкторії руху трубопроводу під час роботи машини.*

*Ключові слова:* GPS-датчик, координати, дощувальна машина, трубопровід, переміщення, рух по колу, система моніторингу, дистанційне керування, підтримка прийняття рішень,

И.В. БАЙРАК, А. В. РУДАКОВА, Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО  
Херсонский Национальный Технический Университет

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ GPS-ДАНЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КРУГОВОГО ДВИЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН

*Рассмотрено использование GPS-технологий для контроля параметров движения объектов сельскохозяйственного назначения. Проанализированы конструкционные особенности дождевальной машины «Фрегат» и предложены точки для установки GPS-датчиков, которые позволят отслеживать перемещение машины и связанные с ним параметры. Обнаружены проблемы, которые возникают при использовании GPS-датчиков в условиях работы дождевальной машины и предложены методы их решения. Предложен метод коррекции полученных с GPS-датчиков данных, который возможен за счет установки дополнительной точки отслеживания на неподвижной опоре, являющейся центром вращения конструкции. Приведен пример расчета корректировки данных по предложенным методам. Графически представлены результаты обработки и корректировки массива данных с датчиков, установленных на работающей дождевальной машине. В результате обработки данные были масштабированы согласно длины дуг параллели и меридиана на  $1^\circ$ , согласно географическому расположению объекта исследования, относительно его центра вращения. Определены отклонения значений данных, предоставляемых GPS-датчиками, от реального расположения машины для каждой из координат и общее отклонение по разнице полученных длин трубопровода. По результатам расчета обнаружено максимальную амплитуду отклонения предоставленных GPS-датчиками координат. Результаты расчета представлены в графическом формате, на котором можно наблюдать динамику отклонений во времени. Согласно особенностей перемещения трубопровода при работе дождевальной машины предложено установку дополнительной точки отслеживания на трубопроводе, которая позволит получать информацию о кривизне конструкции. Проанализированы места возможных*

*отклонений вдоль трубопровода при работе машины и обнаружено наиболее целесообразную для отслеживания точку. Предложен метод расчета кривизны трубопровода по координатам трех точек отслеживания: точки конца трубопровода, точки центра вращения конструкции и дополнительной точки отслеживания, что соответствует середине трубопровода. Приведен пример расчета отклонения дополнительной точки отслеживания от идеальной траектории движения трубопровода при работе машины.*

*Ключевые слова: GPS-датчик координаты дождевальная машина, трубопровод, перемещение, движение по кругу, система мониторинга, дистанционное управление, поддержка принятия решений,*

I.V. BAIRAK, H.V. RUDAKOVA, Yu.O. LEBEDENKO  
Kherson National Technical University

## **METHODS OF GPS-DATA PROCESSING FOR CONTROL OF CIRCULAR MOVEMENT OF SPRINKLER MACHINES**

*The usage of GPS-technologies for the movement controlling of agricultural objects is considered. The design features of the «Frigate» sprinkler are analyzed. Points for the installation of GPS-sensors, which will allow tracking the movement of the machine and related parameters, are proposed. The problems of GPS-sensors usage in the sprinklers are detected and the methods of their solution are offered. A method of correction the data obtained from GPS-sensors is proposed. This method is possible by installing an additional tracking point on a fixed support, which is the center of rotation of the construction. An example of calculation of data correction by the proposed methods is given. The results of processing and correction the array of data from the sensors installed on the running sprinkler are presented in graphs. Because of processing, the data were scaled according to the length of the arcs of the parallel and the meridian by 1° in the geographical location of the object, relative to its center of rotation. The deviation of the values of the data provided by GPS-sensors from the actual location of the machine for each of the coordinates and the total deviation calculated by the difference in the obtained lengths of the pipeline are determined. According to the results of the calculation, the maximum deviation amplitude of the coordinates provided by GPS-sensors was detected. The results of the calculation are presented in graphs where you can observe the dynamics of deviations over time. According to the features of the movement of the pipeline during the operation of the sprinkler, it is proposed to install an additional tracking point on the pipeline, which will provide information about the curvature of the construction. The places of possible deviations along the pipeline during the operation of the machine were analyzed and the most expedient point for tracking was identified. A method for calculating the curvature of the pipeline by the coordinates of three tracking points: the end of the pipeline, the point of the center of construction rotation and an additional tracking point in the middle of the pipeline is proposed. An example of calculating the deviation of an additional tracking point from the perfect trajectory of the pipeline movement during machine operation is given.*

*Keywords: GPS sensor, coordinates, sprinkler, pipeline, movement, circular motion, monitoring system, remote control, decision support,*

### **Постановка проблеми**

Останнім часом широко використовуються системи дистанційного моніторингу переміщення рухомих об'єктів з використанням GPS технологій. Актуальною задачею є застосування таких технологій для контролю параметрів руху об'єктів сільськогосподарського призначення [1]. Одним з таких об'єктів, пересування якого необхідно відстежувати, є дощувальні машини типу «Фрегат», які знайшли поширене застосування в закритих зрошувальних системах на півдні України.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Дощувальні машини типу «Фрегат» (ДМУ) мають круговий характер переміщення навколо нерухокої опори і представляють собою трубопроводи з середньоструйними дощувальними апаратами, що розташовані на опорах. Переміщення здійснюється за допомогою візків, що приводяться до руху гідроприводом [2]. Загальний вигляд дощувальної машини наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд ДМУ «Фрегат»

Особливістю переміщення машини є конструкція трубопроводу, що передбачає гнучкість сегментів трубопроводу. В такому разі доцільним є відстеження не тільки початкових і кінцевих координат трубопроводу, а й додаткових точок повздовж усієї довжини для виявлення відхилень показників за допустимі межі та передбачення аварійних ситуацій [3]. Відстеження руху важливих точок є можливим за рахунок конструкції дощувальної машини, на елементи якої встановлюються GPS-датчики. Однак використання GPS-датчиків має суттєвий недолік: отримані показники місцезнаходження об'єкту можуть не відповідати дійсності.

Завдяки особливостям роботи GPS навігації, основними причинами порушення точності даних з датчиків зазвичай виступають атмосферні умови та відбиття і спотворення. Швидкість світла, що використовується у формулах розрахунку координат є постійною у вакуумі, але може змінюватися у земній атмосфері. Навіть незначне уповільнення сигналу при проходженні іоносфери чи хмар здатне вносити серйозні відхилення [4].

#### Мета дослідження

Метою дослідження є розробка методів обробки GPS-даних для контролю та ідентифікації параметрів руху дощувальних машин типу «Фрегат».

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Джерелом інформації є дані, що отримуються з GPS-датчиків. Схему переміщення дощувальної машини в процесі роботи зображено на рис. 2. Як зазначено вище, доцільно встановлювати один датчик в нерухомій точці  $O (X_0, Y_0)$ , яка є центром обертання конструкції. Іншим місцем для встановлення такого датчика є кінцева точка трубопроводу  $D (x_d, y_d)$ .

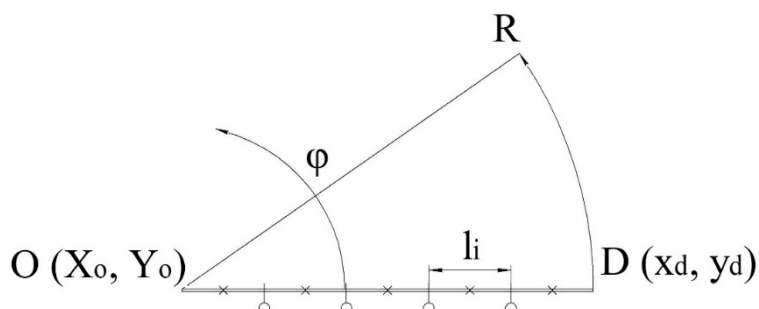


Рис. 2. Схема переміщення дощувальної машини

### 1. Коригування GPS-даних.

Коригування даних, отриманих з GPS-датчиків, необхідно для знаходження дійсних координат точок відстеження, їх обробки та подальшого проведення дослідження. Дані надходять у форматі геодезичних еліпсоїдальних координат і в процесі розрахунку мають бути масштабовані згідно довжини дуг паралелі та меридіану на 1<sup>о</sup> відповідно до географічного розташування машини.

Для коригування GPS- даних необхідно виконати наступні дії:

Розрахунок різниці в градусах між координатами кінцю трубопроводу та нерухомої опори. Для кожної координати виконується за наступними формулами:

$$\Delta x_1 = x - x_0; \Delta y_1 = y - y_0, \quad (1)$$

де  $x_0, y_0$  – поточні координати точки центру, в градусах;  $x, y$  – поточні координати рухомої точки відстеження, в градусах.

Масштабування результатів (1) можна виконати помноживши його на довжину дуг паралелі та меридіану на 1<sup>о</sup>:

$$L_{x1} = \Delta x_1 \cdot l_x; L_{y1} = \Delta y_1 \cdot l_y, \quad (2)$$

де  $l_x, l_y$  – довжина дуги паралелі по довготі, довжина дуги меридіану на широті на 1<sup>о</sup>, м.

Для визначення відстані від центру до кінця в метрах для кожної координати використовуються наступні формули:

$$L_{x2} = R_0 \cdot \frac{L_{x1}}{\sqrt{L_{x1}^2 + L_{y1}^2}}; L_{y2} = R_0 \cdot \frac{L_{y1}}{\sqrt{L_{x1}^2 + L_{y1}^2}}, \quad (3)$$

де  $R_0$  – радіус трубопроводу, м.

Відстань від центру до кінця в градусах для кожної координати визначається за формулами:

$$\Delta x_2 = \frac{L_{x2}}{l_x}; \Delta y_2 = \frac{L_{y2}}{l_y}, \quad (4)$$

Для отримання дійсних координат точки відстеження, необхідно додати визначену за формулою (4) відстань до координат положення нерухомого GPS-датчика з координатами  $(X_0, Y_0)$ :

$$\tilde{x} = \Delta x_2 + X_0; \tilde{y} = \Delta y_2 + Y_0. \quad (5)$$

Після підстановки виразів (1)–(4) в (5) та спрощення, отримано загальні формули корекції координат рухомої точки відстеження:

$$\tilde{x} = \frac{X_0 \cdot \sqrt{l_x^2 \cdot (x_0 - x)^2 + l_y^2 \cdot (y_0 - y)^2} - R_0 \cdot x_0 + R_0 \cdot x}{\sqrt{l_x^2 \cdot (x_0 - x)^2 + l_y^2 \cdot (y_0 - y)^2}}; \quad (6)$$

$$\tilde{y} = \frac{Y_0 \cdot \sqrt{l_x^2 \cdot (x_0 - x)^2 + l_y^2 \cdot (y_0 - y)^2} - R_0 \cdot y_0 + R_0 \cdot y}{\sqrt{l_x^2 \cdot (x_0 - x)^2 + l_y^2 \cdot (y_0 - y)^2}} \quad (6)$$

Розрахунки за наведеними виразами (1)–(6) проводилися на основі реальних даних, отриманих від GPS-датчиків, встановлених на дощувальній машині «Фрегат» в центрі її вісі обертання та на кінцевій точці трубопроводу.

З встановлених датчиків, згідно протоколу передачі GPS-даних [5], надходять дані в форматі, представленому у табл. 1. Початкові дані для проведення корекції наведено в табл. 2.

Табл. 1

Приклад даних, що надходять з GPS-датчиків

Назва	Ім'я	Значення
Номер запису	id	118397
Назва датчику	actionName	GPS Radius
Номер машини	machineId	3
Координати широти	lat	46.744335
Координати довготи	lon	33.613293
Супутник	sat	16
Час створення	createdAt	2019-07-02T00:08:54.901Z
Час оновлення	updatedAt	2019-07-02T00:08:54.901Z

Табл. 2

Початкові дані для розрахунку

Назва	Значення
Координати нерухомого центру, °	$X_0 = 46.744160^0; Y_0 = 33.616680^0$
Координати центру, отримані з GPS-датчиків, °	$x_0 = 46.744152^0; y_0 = 33.616702^0$
Координати рухомої точки відстеження, °	$x = 46.746061^0; y = 33.611267^0$
Довжина трубопроводу, або радіус, м	$R_0 = 462.6 \text{ м.}$
Довжина дуг паралелі та меридіану на 1°, м	$l_x = 76057 \text{ м}; l_y = 110989 \text{ м.}$

Розрахуємо різницю між точками за формулами (1):

$$\Delta x_1 = 0.001909^\circ; \Delta y_1 = -0.005435^\circ.$$

В результаті масштабування за формулами (2) одержимо різницю між координатами в метрах:

$$L_{x1} = 211.91 \text{ м}; L_{y1} = -413.339 \text{ м.}$$

Відстань від центру до кінця трубопроводу, визначена за формулами (3) складе:

$$L_{x2} = 211.046 \text{ м}; L_{y1} = -411.653 \text{ м.}$$

Для переходу до розрахунку в градусах здійснимо обчислення за формулами (4):

$$\Delta x_2 = 0.001902^\circ; \Delta y_2 = -0.005412^\circ.$$

Визначені скориговані координати за формулами (5):

$$\tilde{x} = 46.746062^\circ; \quad \tilde{y} = 33611268^\circ.$$

Отримані результати відображають дійсні координати місцезнаходження точки радіусу в окремий момент часу.

Спостереження руху дощувальної машини велося на протязі 50 годин з інтервалом реєстрації даних близько 60 секунд. В результаті чого отримано масиви даних з координатами широти і довготи, та відповідним їм часом для вказаних точок.

В процесі обробки дані про час були переведені в більш зручний для опрацювання формат – секунди. Початок запису є точкою відліку і дорівнює нулю, а значення наступних показників були скориговані відносно точки відліку.

Результати запису координат GPS-датчиків та скориговані дані про переміщення дощувальної машини, за якою велося спостереження, наведено на рис.3.

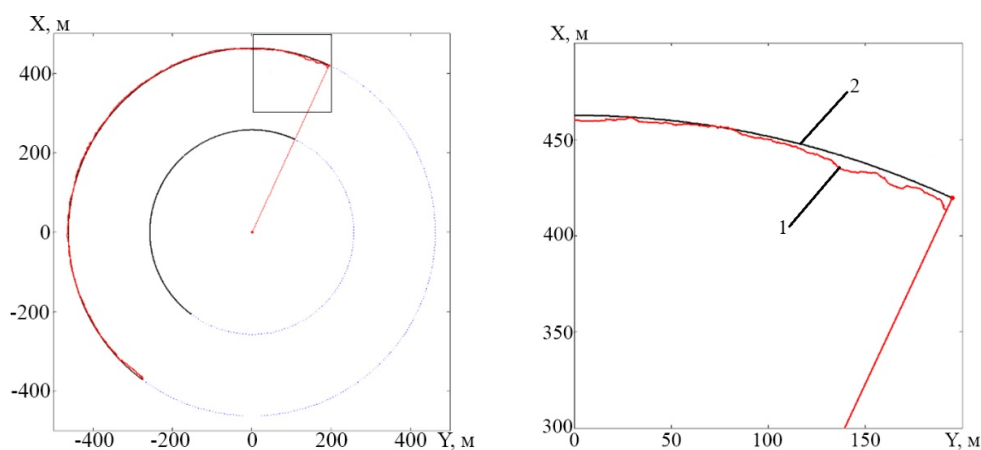


Рис. 3. Відстеження переміщення ДМУ: 1 – GPS-дані; 2 – скориговані дані

Вирахувати відхилення від дійсних значень для кожної координати можна за наступними формулами:

$$\Delta x = \tilde{x} - x; \quad \Delta y = \tilde{y} - y. \quad (7)$$

Результати розрахунків для наявного масиву даних за формулами (7) представлено на рис. 4. Вони відображають відхилення від дійсної траєкторії для кожної з координат, що змінюється у часі. Для зручності сприйняття час було переведено в години.

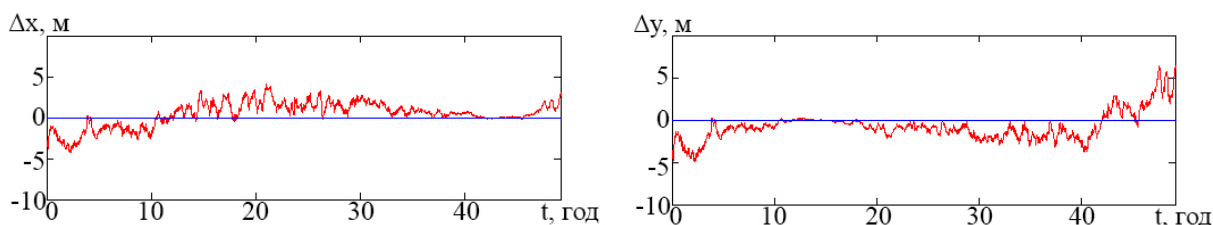


Рис. 4. Відхилення координат X та Y

Доцільно розрахувати загальне відхилення за різницею отриманих радіусів. Обчислити довжину трубопроводу до корекції у метрах можна за формулою:

$$R = \sqrt{l_x^2 \cdot (x - X_0)^2 + l_y^2 \cdot (y - Y_0)^2}. \quad (8)$$

Тоді формула для визначення відхилення буде наступною:

$$\Delta R = R - R_0. \quad (9)$$

Результати розрахунку за формулами (8)–(9) для наявного масиву даних представлено на рис. 5.

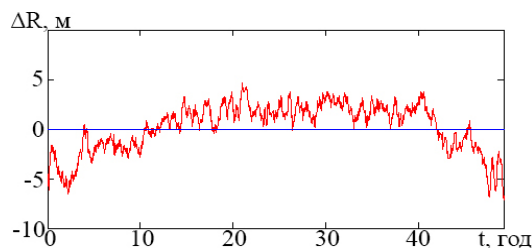


Рис. 5. Відхилення переміщення машини від дійсного значення

В даному випадку відхилення не перевищувало 10 метрів в амплітуді, однак відхилення можуть бути значно більшими.

## 2. Виявлення критичних відхилень трубопроводу в процесі роботи.

При ідеальній роботі машини трубопровід являє собою пряму лінію, але сегменти трубопроводу можуть вигинатися, згідно з конструкцією машини під впливом зовнішніх факторів. Зазвичай точка перегину виникає в середині трубопроводу, тому встановлення додаткового датчику в точці  $M(x_m, y_m)$ , що відповідає середині трубопроводу, дозволяє вирахувати величину відхилення від ідеальної траєкторії руху машини.

Знаючи дві вимірювані точки а саме центр обертання  $O(x_o, y_o)$  та кінець трубопроводу  $D(x_d, y_d)$ , можна скласти рівняння прямої за двома точками. Відхилення трубопроводу в такій ситуації зображено на рис. 6. Зазвичай відхилення не досягає значень, що зображені на рисунку, але для зручності сприйняття він представлений в такому вигляді.

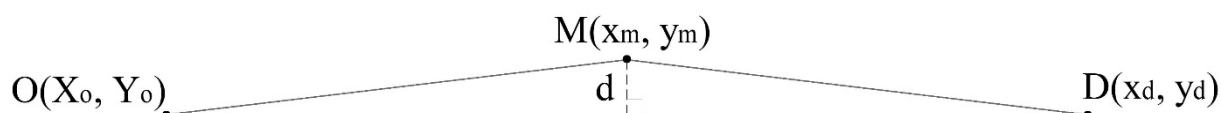


Рис. 6. Відхилення додаткової точки відстеження.

В загальному вигляді рівняння прямої виглядає так:

$$A \cdot X + B \cdot Y + C = 0, \quad (10)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти рівняння.

Коефіцієнти рівняння можна визначити за формулами:

$$A = y_d - Y_0; \quad B = X_0 - x_d; \quad C = x_d \cdot Y_0 - y_d \cdot X_0, \quad (11)$$

де  $x_d, y_d$  – скориговані координати радіусу трубопроводу.

Відстань від точки до прямої на площині визначається за наступною формулою:

$$d = \frac{A \cdot x_m + B \cdot y_m + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (12)$$

де  $x_m, y_m$  – скориговані координати додаткової точки відстеження.

Підставивши вираз (11) в (12), скоригувавши дані відносно довжини дуг паралелі та меридіану на  $1^\circ$  та спростивши вираз отримаємо формулу для розрахунку відхилення у метрах за трьома точками з корекцією на географічне місцезнаходження:

$$d = -\frac{l_x \cdot l_y (x_d \cdot y_m - x_m \cdot y_d - x_d \cdot Y_0 + X_0 \cdot y_d + x_m \cdot Y_0 - X_0 \cdot y_m)}{\sqrt{(l_x \cdot x_d - l_x \cdot X_0)^2 + (l_y \cdot y_d - l_y \cdot Y_0)^2}}. \quad (13)$$

Запропонований метод розрахунку відхилення має свій недолік. Якщо точка відстеження знаходиться за межами точок O та D, то буде визначатися найкоротша відстань до прямої. Завдяки конструкційним особливостям такі випадки неможливі при нормальній роботі машини, тому запропонований метод є достатнім для вирішення цієї задачі. Для вирішення такої задачі необхідно мати координати трьох точок і дані про довжину дуг на географічному місцезнаходженні машини. Дані для розрахунку були частково отримані при розгляді попереднього прикладу та наведені у табл. 3.

Табл. 3

Початкові дані для розрахунку відхилення трубопроводу

Назва	Значення
Координати нерухомого центру, $^\circ$	$X_0 = 46.744160^\circ; Y_0 = 33.616680^\circ$
Скориговані координати рухомої точки кінця трубопроводу, $^\circ$	$x_d = 46.745213^\circ; y_d = 33.613671^\circ$
Скориговані координати додаткової точки відстеження, $^\circ$	$x_m = 46.745221^\circ; y_m = 33.613676^\circ$
Довжина дуг паралелі і меридіану на $1^\circ$ , м	$l_x = 76057 \text{ м}; l_y = 110989 \text{ м}.$

Визначимо коефіцієнти рівняння прямої за формулами (11) та масштабуємо результат відносно центру обертання машини:

$$A = -411.666 \text{ м}; B = -211.022 \text{ м}; C = 0 \text{ м}.$$

Підставивши отримані коефіцієнти у формулу (12) та виконавши масштабування, визначимо відхилення в метрах:

$$d = 0.393 \text{ м}.$$

Отриманий результат відображає відхилення точки відстеження до прямої у метрах. В даному випадку відхилення не перевищує одного метру. У випадку, якщо відхилення точок перевищує критичне значення, слід зупинити рух машини та перевірити трубопровід. Крім того, можливі випадки з крадіжкою компонентів або датчиків, у такому разі можна відстежити їх переміщення під час викрадення.

### Висновки

Завдяки встановленню GPS-датчиків на дощувальній машині «Фрегат» можна отримувати дані про переміщення машини для контролю її руху в режимі роботи. Запропоновані методи дозволяють коригувати спотворення даних, що отримуються від GPS-датчиків. Завдяки встановленню одного з датчиків на нерухому частину конструкції є можливим застосування запропонованих методів.



При встановленні додаткових точок контролю координат повздож трубопроводу є можливість визначати стан трубопроводу з метою виявлення його кривизни та критичних перегинань конструкції. Це надає можливість своєчасно приймати рішення щодо режиму роботи дощувальної машини або її аварійної зупинки.

#### **Список використаної літератури**

1. Тараріко О. Г., Сиротенко О. В., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л. Арго-екологічний супутниковий моніторинг. Київ: Аграрна наука, 2019. 204 с.
2. Кузнецова Е. И., Закабунина Е. Н., Снопич Ю. Ф. Орошаемое земледелие. Москва: ФГБОУ ВПО РГАЗУ, 2012. 117 с.
3. Слюсаренко В. В., Хизов А. В., Русинов А. В. Машины и оборудование для орошения сельскохозяйственных культур. Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2011. 161 с.
4. Куприянов А. О. Глобальные навигационные спутниковые системы. Москва: МИИГАиК, 2017. 76 с.
5. Betke K. The NMEA 0183 Protocol, 2000. 28 с.

#### **References**

1. Tarariko, O. H., Syrotenko, O. V., Iliencko, T. V., & Kuchma, T. L. (2019). Arho-ekolohichnyi suputnykovyi monitorynh. Kyiv: Ahrarna nauka
2. Kuznetsova, E. I., Zakabunina, E. N., & Snipich, Yu. F. (2012). Oroshaemoe zemledelie. Moskva: FGBOU VPO RGAZU
3. Slyusarenko, V. V., Hizov, A. V., & Rusinov, A. V. (2011). Mashyny i oborudovanie dlya orosheniya selskohozyaystvennyih kultur. Saratov: FGOU VPO «Saratovskiy GAU».
4. Kupriyanov, A. O. (2017). Globalnyie navigatsionnyie sputnikovyie sistemyi. Moskva: MIIGAik.
5. Betke Klaus. (2000). The NMEA 0183 Protocol.

Байрак Ігор Віталійович – аспірант кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: ihorbairak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7857-5176.

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: rudakovaanna25@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8053-4218.

Лебеденко Юрій Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: lebedenko@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.