

**Антощенко Р. В.,
Лебедєв А. Т.,
Антощенко В. М.**
Харківський національний технічний
університет сільського господарства
імені Петра Василенка
E-mail: roman.tiaxntusg@gmail.com

КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ВИТРАТАМИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

УДК 621.01:531.01

В роботі неведена методика керування енергетичними витратами багатоелементних комбінованих машинно-тракторних агрегатів. Ефективне керування енергетичними витратами призводить до підвищення ефективності експлуатації останніх. Розглянуті задачі оптимальної швидкодії та мінімальної витрати енергії. Для машинно-тракторного агрегату розраховано витрату енергії для двох режимів керування та двох радіусів. Встановлено, виконання розвороту з несталим радіусом повороту призводить до зниження витрати енергії на розворот.

Ключевые слова: машинно-тракторний агрегат, керування, витрата енергії, траєкторія руху.

Вступ

Освоєння енергозберігаючих технологій виробництва продукції рослинництва є одним з пріоритетних напрямів розвитку машино-технологічної сфери АПК. При цьому першочерговими за актуальністю задачами є розробка методів енергетичної оцінки технологій та зниження енерговитрат МТА [1-3].

Аналіз публікацій

Використання тракторів з потужністю більше 250 к.с. під час виробництва продукції рослинництва дозволило підвищити ефективність експлуатації широкозахватних комбінованих ґрунтообробно-посівних агрегатів в господарствах з великою площею земельних угідь [4]. Дослідження динаміки даних агрегатів нерозривно пов'язане з дослідженням енергетичних витрат його елементами та агрегатом в цілому. Пошук найефективніших рішень використання агрегатів потребує дослідження енергетичних показників функціонування та пошуку шляхів енергозбереження. Підвищення енергетичної ефективності сільськогосподарської техніки та агрегатів являється складною задачею через багатоступінчатість її структури та через надвелику кількість керованих й некерованих показників, що впливають на процес функціонування [5].

Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування методу керування енергетичними витратами багатоелементних комбінованих машинно-тракторних агрегатів, що призводить до підвищення ефективності їх використання.

Основна частина

Принцип максимуму, сформульований академіком Понтрягіним Л. С. [6], є розвитком і узагальненням класичного варіаційного числення з урахуванням обмежень на параметри керування, коли класичний метод не дає рішення для оптимального керування.

Розглянемо комбінований багатоелементний МТА, як динамічну систему, що описується диференціальними рівняннями. При цьому будемо припускати, що значення

керуючих впливів U можуть миттєво змінюватися й описуються класом кусково-безперервних функцій з кінцевим числом точок розриву першого роду й обмежених компонентів [7]:

$$U \in U^*,$$

де U^* – обмежений простір припустимих керувань.

Критерій оптимальності визначає якість керування і є основою для формування задачі керування енергетичними процесами в багатоеlementних динамічних системах.

Відповідно до загальної постановки задачі оптимального керування критерій оптимальності має вигляд:

$$J = \int_0^{T_f} f_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}, t) dt = \min. \quad (1)$$

Основні типи критеріїв оптимальності керування енергетичними витратами багатоеlementних агрегатів є:

- максимальна швидкодія;
- мінімум витрати енергії (мінімум витрати палива).

В задачі максимальної швидкодії підінтегральний вираз:

$$f_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}, t) = 1,$$

а мінімізований функціонал:

$$J = \int_0^{T_f} dt = T_f = \min.$$

У задачах керування рухомими об'єктами змінна U пропорційна швидкості витрати маси і, як правило, обмежена. У зв'язку з тим, що загальний запас палива також обмежений, будь-який складний рух чи рух за курсом повинен здійснюватися з мінімальними витратами палива. Критерій оптимальності для цього випадку має вигляд:

$$J = \int_0^{T_f} \sum_{j=1}^r |u_j| dt = \min, \quad (2)$$

та являє собою суму швидкостей витрат палива за одиницю часу u_j ; інтеграл від неї відповідає загальному використанню палива.

Однією із задач керування енергетичними процесами в багатоеlementних агрегатах є умова, в яких квадрат керуваної змінної U пропорційний потужності, а результат його інтегрування пропорційний витраченій енергії. Наприклад, в багатоеlementному МТА витрачається потужність двигуна трактора на пересування його елементів, подолання опору ґрунту та привід допоміжних органів. За такої умови критерій оптимальності має вигляд:

$$J = \int_0^{T_f} \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{U} dt = \min,$$

де \mathbf{Q} – симетрична вагова матриця, що визначає кількість витраченої потужності елементом агрегату.

У більш загальному вигляді:

$$J = \int_0^{T_f} [\mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{U} + \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X}] dt + \int_0^{T_f} \mathbf{X}^T \mathbf{M} \mathbf{U} dt = \min, \quad (3)$$

де \mathbf{Q} , \mathbf{P} , \mathbf{M} – симетричні, позитивно визначені вагові матриці, компоненти яких у загальному випадку є функціями часу.

Сформуємо функцію стану, запропоновану Понтрягіним Л. С. [6], що називається Гамільтоніан:

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = p_0 f_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}) + \mathbf{p}^T (\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}), \quad (4)$$

де p_0 – допоміжна змінна; \mathbf{p} – вектор-рядок допоміжних змінних.

Ця умова означає, що Гамільтоніан для оптимального керування приймає відповідно до принципу максимуму максимальне значення. Для практичних задач оптимізації застосовують також принцип мінімуму, за яким визначають мінімум Гамільтоніану. Тоді $p_0 = +1$; в іншому випадку рівняння й умови оптимальності аналогічні принципу максимуму з заміною операції обчислення максимуму гамільтоніану на обчислення мінімуму.

При виконання технологічної операції сівби посівними агрегатами траєкторія руху трактору й слідкуючими за ним елементами повинна бути прямою лінією за виключенням розворотів, об'їздом перешкод або повторювати контури поля. На підтримання прямолінійного руху або виконання розворотів витрачається енергія. Задача зниження витрат енергії при виконанні розворотів та підтримання прямолінійної траєкторії є актуальною. Така задача розглядалась для голономних динамічних моделей транспортних засобів [8] та неголономних [9].

Розглянемо схему руху трактору по заданій траєкторії (рис. 1).

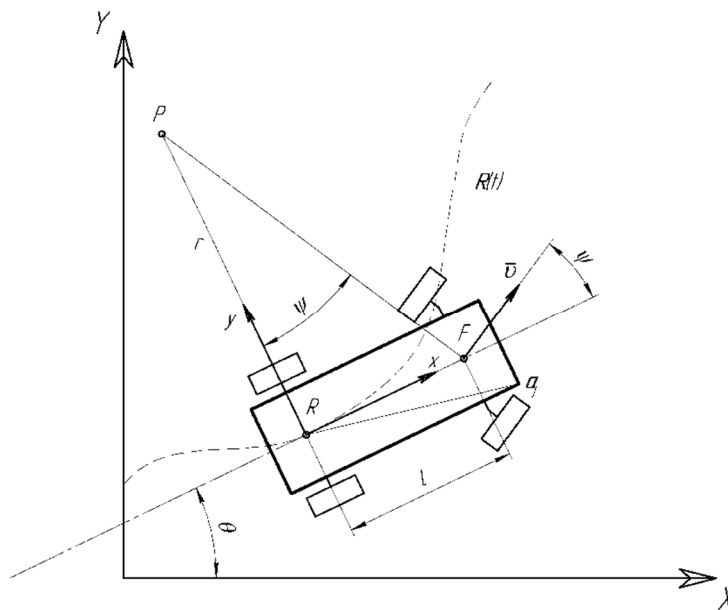


Рис. 1 – Схема руху трактору по заданій траєкторії

Розташування неголономної динамічної моделі трактору в просторі задається трьома координатами $(x, y, \theta) \in \mathbb{R}^2 \times [0, 2\pi)$, де (x, y) координати центру задньої вісі R по відношенню до нерухливої (глобальної) системи координат та куту орієнтації θ , тобто куту між повздовжньою віссю трактору та віссю x нерухливої системи координат. Кут повороту керованих коліс трактору $0 \leq \psi \leq \psi_{\max}$, $|\psi| = \arctg\left(\frac{1}{r}\right)$ задається між повздовжньою віссю трактору та вектору швидкості \bar{v} , що виходить з центру передньої F . Нарешті, r радіус траєкторії руху $\mathbf{R}(t)$.

Траєкторія руху трактору, як неголономної динамічної моделі, з мінімальною витратою енергії, тобто $E \rightarrow \min$, повинна визначатися наступними критеріями [10]:

1. Довжина шляху по траєкторії повинна бути мінімальною;

2. Траєкторія повинна мати найменші радіуси повороту;
3. Траєкторія повинна бути без гострих кутів та з оптимальною параметризацією.

Трактор, як неголономна динамічна модель \mathbf{A} моделюється, як опуклий багатокутник, що переміщається в двовимірному середовищі $W = [0, 1]^2 \in \mathbb{R}^2$. Центр вісі задніх коліс R рухається по траєкторії $R = \mathbf{R}(t) = (x(t), y(t))$, що представлена кривою В-сплайном:

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^{K-1} N_{i,d}(t) \mathbf{p}_i, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5)$$

де K – кількість точок \mathbf{p}_i ; $N_{i,d}$ – базисні функції кривої В-сплайну; d – кількість ступенів кривої.

Траєкторія руху $\mathbf{R}(t)$ визначається в параметричному просторі S (без втрати спільності вважаємо, що параметричний простір S є фактичним робочим простором \mathbf{W}).

Варіаційна проблема проектування оптимальної кривої траєкторії руху зосереджена у визначенні $(K - 2)$ контрольних точок \mathbf{p}_i , таким чином, щоб крива R задовольняла критеріям 1-3. Перша і остання контрольні точки, а саме, \mathbf{p}_0 і \mathbf{p}_{K-1} є початком та кінцем криволінійної траєкторії.

Довжина траєкторії довільної форми, як довжина R на просторі S визначається:

$$L = \int_0^1 \sqrt{E \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + 2F \frac{dx}{dt} \frac{dy}{dt} + G \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} dt, \quad (6)$$

де E , F , G – величини першої фундаментальної форми S .

При урахуванні форми трактора, який не повинен перетинатися з перешкодами, вимірюємо гладкість відстані до вершин \mathbf{a}_j трактора \mathbf{A} на параметричному просторі S . Таким чином, так само, як серединою задньої вісі трактора слідує траєкторією $\mathbf{R}(t)$, кожна вершина \mathbf{a}_j слідує за кривою $\mathbf{a}_j = \mathbf{a}_j(t)$ на фактичному просторі \mathbf{W} , де його зображення на S задається $S(\mathbf{a}_j(t))$. Визначаємо гладкість $S(\mathbf{a}_j(t))$ через:

$$H_j = \int_0^1 S_z(\mathbf{a}_j(t)) dt, \quad j = 1, \dots, n_A, \quad \text{при } n_A \geq 2, \quad (7)$$

де $S_z(\mathbf{a}_j(t))$ – z-координата зображення \mathbf{a}_j , $j = 1, \dots, n_A$ на S ; n_A – кількість вершин, які визначають форму \mathbf{A} .

Додаванням рівнянь (6) та (7) визначаємо мінімальну витрату енергії на рух по криволінійній траєкторії:

$$E = \sum_{j=1}^{n_A} H_j + L, \quad (8)$$

що також задовольняє критеріям 1 та 2, тобто довжина шляху по траєкторії повинна бути мінімальною й траєкторія повинна мати найменші радіуси повороту.

Для задоволення третього критерію, який визначає, що траєкторія повинна бути без гострих кутів та з оптимальною параметризацією витрата енергії визначається:

$$E = \int_0^1 \|\mathbf{R}'(t)\|^2 dt + \int_0^1 \|\mathbf{R}''(t)\|^2 dt + \left\| \mathbf{T}_0 - \frac{\mathbf{R}'(0)}{\|\mathbf{R}'(0)\|} \right\|^2 + \left\| \mathbf{T}_{K-1} - \frac{\mathbf{R}'(1)}{\|\mathbf{R}'(1)\|} \right\|^2, \quad (9)$$

де $\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_{K-1}$ – початкова та кінцева орієнтація трактору на гоні при розвороті.

Розрахуємо траєкторії руху трактора на розвороті з постійним радіусом повороту $R = const$ та нелінійним $R \neq const$. Результати чисельного розрахунку наведено на рис. 2. Радіус повороту трактора для двох випадків обирався на основі результатів теоретичних досліджень та складав $R_{path_1} = 7,1$ м й $R_{path_2} = 7,0$ м [11].

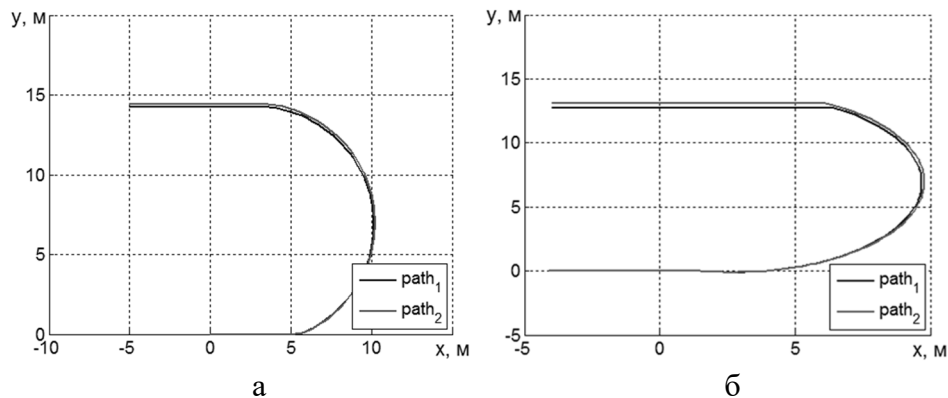


Рис. 2 – Траєкторії руху трактора при розвороті на гоні при постійному радіусі повороту (а) та нелінійному радіусі (б):
 $path_1$ – траєкторія руху при $R = 7,1$ м ; $path_2$ – траєкторія руху при $R = 7,0$ м

Витрата енергії на розворот з постійним радіусом повороту $R = const$ визначалась за формулою (8) і склала $E_{path_1} = 15,29$ МДж для $R_{path_1} = 7,1$ м й $E_{path_2} = 14,36$ МДж для $R_{path_2} = 7,0$ м (рис. 3). При русі на розвороті з непостійним радіусом $R \neq const$ витрата енергії склала $E_{path_1} = 13,43$ МДж для $R_{path_1} = 7,1$ м й $E_{path_2} = 12,51$ МДж для $R_{path_2} = 7,0$ м (рис. 3).

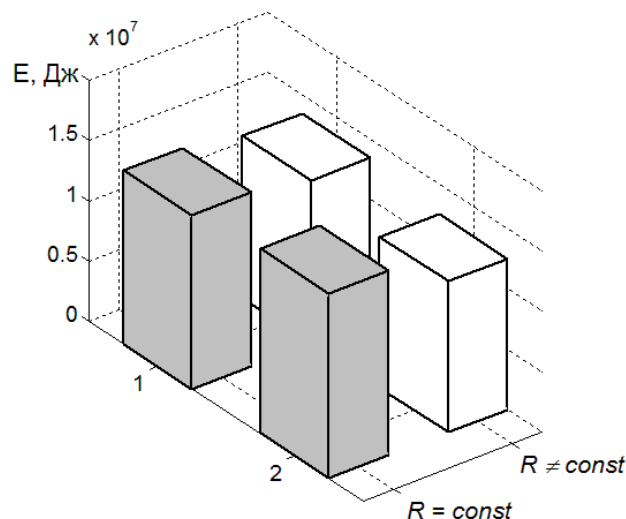


Рис. 3 – Витрати енергії на виконання розвороту трактором:
 1 – при радіусі повороту $R = 7,1$ м ; 2 – при $R = 7,0$ м

Таким чином, виконання розвороту з несталим радіусом повороту призводить до зниження витрати енергії на розворот з 14,36 МДж до 12,51 МДж. Додаткове зниження

витрат енергії на розвороти можна досягти обранням найнижчого можливого радіусу розвороту для даного трактора та сільськогосподарської машини за допомогою системи автоматичного керування напрямком руху GPS RTK [12].

Висновки

1. При виконанні технологічної операції сівби посівними агрегатами траєкторія руху трактору й слідуючими за ним елементами повинна мати пряму лінію за виключенням розворотів, об'їздів перешкод або повторюєві контурів поля.

2. Траєкторія руху трактору, як неголономної динамічної моделі, з мінімальною витратою енергії, тобто $E \rightarrow \min$, повинна визначатися наступними критеріями: довжина шляху по траєкторії повинна бути мінімальною; траєкторія повинна мати найменші радіуси повороту; траєкторія повинна бути без гострих кутів та з оптимальною параметризацією.

3. Витрата енергії на розворот з постійним радіусом повороту $R = const$ склала $E_1 = 15,29$ МДж для $R_1 = 7,1$ м й $E_2 = 14,36$ МДж для радіусу $R_2 = 7,0$ м. При русі на розвороті з непостійним радіусом $R \neq const$ витрата енергії склала $E_1 = 13,43$ МДж для $R_1 = 7,1$ м й $E_2 = 12,51$ МДж для $R_2 = 7,0$ м. Виконання розвороту з несталим радіусом повороту призводить до зниження витрати енергії на розворот з $14,36$ МДж до $12,51$ МДж. Додаткове зниження витрат енергії на розвороти можна досягти обранням найнижчого можливого радіусу розвороту для даного трактора та сільськогосподарської машини за допомогою системи автоматичного керування напрямком руху GPS RTK.

Література

1. Погорелый Л. В. Повышение эксплуатационно-технологической эффективности сельскохозяйственной техники / Л. В. Погорелый. К.: Техника, – 1990. – 176 с.
2. Пастухов В. І. Обґрунтування оптимальних комплексів машин для механізації польових робіт: дис. докт. техн. наук: 05.05.11 / В. І. Пастухов; ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Х., 2006. – 374 с.
3. Козаченко О. В. Ресурсозбереження в сільськогосподарських агрегатах при виконанні технологічних операцій у рослинництві: дис... докт. техн. наук: 05.05.11 / О. В. Козаченко; Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2006. – 317 с.
4. Антощенко В. М. Огляд українського ринку тракторів потужністю 260-390 к.с. / В. М. Антощенко, Р. В. Антощенко, А. П. Гуртов, Д. В. Станіславенко // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 148. – С. 258-262.
5. Хафизов К. А. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторных агрегатов путем уменьшения энергозатрат и снижения потерь урожая: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.20.01, 05.20.03 / Казанский государственный аграрный университет. – Казань, 2007. – 22 с.
6. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин – М.: Наука, 1976. – 392 с.
7. Тимченко В. Л. Проектування оптимальних систем управління динамічними об'єктами: метод вказівки / Нац. ун-т кораблебудування ім. адм. Макарова, Каф. комп'ют. систем упр. – Миколаїв: Вид-во НУК, 2006. – 20 с.
8. Latombe J. C. Robot motion planning / J. C. Latombe// Kluwer Academic Publishers,

Boston. – 1991. – 358 p.

9. Kolmanovsky I. Developments in nonholonomic control problems / I. Kolmanovsky, N. H. McClamroch // IEEE Control Systems. – 1995. – PP. 20–36.
10. Xidias E. K. Two-dimensional motion-planning for nonholonomic robots using the bump-surfaces concept / E. K. Xidias, P. N. Azariadis, N. A. Aspragathos // Journal: Computing. – 2007. – № 2 (79). – PP. 109-118.
11. Антощенко Р. В. Математичний апарат обробки даних вимірювальною системою динаміки та енергетики мобільних машин / Р. В. Антощенко // Інженерія природо-користування – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 1 (3). – С. 96-103.
12. Kumar N. R. An Extended Kalman Filter for Low-Cost Positioning System in Agricultural Vehicles / N. R. Kumar, E. Nagabhooshanam // International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). – Chennai. – 2016. – PP. 151-157.

Summary

Antoshchenkov R., Lebedev A., Antoshchenkov V. Control of the energy losses of machine-tractor aggregate

The paper presents a methodology for managing the energy costs of multi-element combined machine-tractor units. Effective management of energy losses leads to increased efficiency of operation. The problems of optimal speed and minimum energy consumption are considered. For the machine-tractor aggregate the power consumption is calculated for two control modes and two radii. It is established that performing a turn with an unstable turning radius leads to a reduction in the energy consumption for the turn.

Keywords: machine-tractor aggregate, control, energy consumption, trajectory.

References

1. Pogorelyj L. V. Povyshenie jekspluatacionno-tehnologicheskoy jeffektivnosti sel'skohoz'jajstvennoj tehniki / L. V. Pogorelyj. K.: Tehnika, – 1990. – 176 s.
2. Pastuhov V. I. Obg'runtuvannja optymal'nyh kompleksiv mashyn dlja mehanizacii' pol'ovyh robit: dys. dokt. tehn. nauk: 05.05.11 / V. I. Pastuhov; HNTUSG im. P. Va-sylenka. – H., 2006. – 374 s.
3. Kozachenko O. V. Resursozberezhennja v sil's'kogospodars'kyh agregatah pry vyko-nanni tehnologichnyh operacij u roslynnictvi: dys... dokt. tehn. nauk: 05.05.11 / O. V. Kozachenko; Harkivs'kyj nacional'nyj tehničnyj universytet sil's'kogo gos-podarstva im. Petra Vasylenka. – Harkiv, 2006. – 317 s.
4. Antoshhenkov V. M. Ogljad ukrai'ns'kogo rynku traktoriv potuzhnistju 260-390 k.s. / V. M. Antoshhenkov, R. V. Antoshhenkov, A. P. Gurtov, D. V. Stanislavenko // Mehani-zacija sil's'kogospodars'kogo vyrobnyctva: Visnyk HNTUSG. – H.: HNTUSG, 2014. – Vyp. 148. – S. 258-262.
5. Hafizov K. A. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija mashinno-traktornyh agregatov putem umen'shenija jenergozatrata i snizhenija poter' urozhaja: avtoref. dis. dok. tehn. nauk: 05.20.01, 05.20.03 / Kazanskij gosudarstvennyj agra-rnyj universitet. – Kazan', 2007. – 22 s.
6. Pontrjagyn L. S. Matematyčeskaja teoryja optymal'nyh processov / L. S. Pontrjagyn – M.: Nauka, 1976. – 392 s.

7. Tymchenko V. L. Proektuvannja optymal'nyh system upravlinnja dynamichnymy ob'jek-tamy: metod vkazivky / Nac. un-t korablebuduvannja im. adm. Makarova, Kaf.komp'jut. system upr. – Mykolai'v: Vyd-vo NUK, 2006. – 20 s.
8. Latombe J. C. Robot motion planning / J. C. Latombe// Kluwer Academic Publishers, Boston. – 1991. – 358 p.
9. Kolmanovsky I. Developments in nonholonomic control problems / I. Kolmanovsky, N. H. McClamroch // IEEE Control Systems. – 1995. – PP. 20–36.
10. Xidias E. K. Two-dimensional motion-planning for nonholonomic robots using the bump-surfaces concept / E. K. Xidias, P. N. Azariadis, N. A. Aspragathos // Journal: Computing. – 2007. – № 2 (79). – PP. 109-118.
11. Antoshhenkov R. V. Matematychnyj aparat obrobky danyh vymirjuval'noju systemoju dynamiky ta energetyky mobil'nyh mashyn / R. V. Antoshhenkov // Inzhenerija pryrodokorystuvannja – Harkiv: HNTUSG, 2015. – Vyp. 1 (3). – S. 96-103.
12. Kumar N. R. An Extended Kalman Filter for Low-Cost Positioning System in Agricultural Vehicles / N. R. Kumar, E. Nagabhooshanam // International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). – Chennai. – 2016. – PP. 151-157.