

ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ МАНЕВРІВ ПОЛЬОВИМИ АГРЕГАТАМИ

Зубко Владислав Миколайовичдоктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-2426-2772
zubkovladislav@ukr.net**Сіренко Юлія Володимирівна**доктор філософії, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-1818-3653
sirenko.ula2018@gmail.com**Калнагуз Олексій Миколайович**старший викладач
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-1710-8416
fakyltet-mex@ukr.net

Продуктивність польових машинних агрегатів значною мірою залежить від робочої ширини захвату, швидкості руху, номінальної потужності двигуна, тягового зусилля засобу, коефіцієнту робочих ходів, а також від раціонального використання робочого часу. Продуктивність також визначається умовами роботи, зокрема формою та розміром ділянки, глибиною обробітку, об'ємом технологічних місткостей, маневровими властивостями агрегатів, кваліфікацією оператора тощо. До одних з резервів підвищення продуктивності відноситься кінематичний параметр коефіцієнт робочих ходів ϕ , що показує ступінь використання на корисну роботу загального шляху агрегату в заїзці, і є важливою характеристикою обраного способу руху, і являється відношенням сумарного робочого шляху агрегату на заїзці до всього пройденого шляху. Значення коефіцієнта залежить від розмірів оброблювальної ділянки (довжини гону), кінематичних показників агрегату – радіуса повороту, довжини виїзду, ширини агрегату, способу і швидкості руху під час поворотів і заїздів. Що більший коефіцієнт ϕ , то менший холостий шлях агрегату і більша його продуктивність. Метою наукового дослідження є аналіз на основі створеної математичної моделі криволінійного руху центра ваги польового агрегату з передніми керованими колесами, запропонований алгоритм використання математичних рівнянь в параметричній формі для моделювання траєкторій (маневрів) енергетичних засобів з використанням передньої вісі на базі табличного процесора Microsoft Excel. В аналізі літературних джерел використовувались методи теоретичного аналізу шляхів підвищення продуктивності машинно-тракторних агрегатів, систематизація параметрів, послідовний аналіз характеристик. У багатьох статтях світових науковців досліджені спроби та шляхи підвищення продуктивності роботи польових агрегатів. Це призводить до скорочення необхідної ширини поворотної смуги, збільшенню довжини гонів, підвищенню продуктивності роботи агрегату, значному зменшенню кількості пошкоджених рослин на засіяних поворотних смугах, зменшенню механіко-технологічних властивостей ґрунту. У висновках наукового дослідження наведений результат раціонального використання змодельованих траєкторій криволінійного руху польових агрегатів з передніми керованими колесами під час виконання робіт сільськогосподарського призначення за допомогою запроваджених алгоритмів, які більш прості і придані для використання на практиці.

Ключові слова: маневри, продуктивність, машинний агрегат, швидкість, поворот, траєкторія, шлях, моделювання, математична модель, ефективність, система точного землеробства.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.6>

Вступ. Сільськогосподарські трактори відіграють дуже важливу роль у аграрному виробництві, оскільки вони є джерелом енергії для різних навісних знарядь та сільськогосподарської техніки. Під час сільськогосподарських робіт трактори споживають велику кількість палива. Споживання палива під час польових робіт залежить від багатьох факторів, у тому числі від одного досить важливого: розміру оброблюваного поля (Koniuszka та ін., 2017, Lacour та ін., 2014). Нові технології, такі як землеробство без обробки землі, можуть зменшити споживання палива в аграрному виробництві.

Згідно з результатами попередніх досліджень (Bietresato et al., 2015, Lovarelli and Bacenetti, 2017, Pitta et al., 2016),

сільськогосподарські трактори, які працюють у полях, найчастіше завантажуються тяговою потужністю, яка становить лише 50–70% від максимальної потужності двигуна. Крім того, двигуни тракторів працюють у режимі холостого ходу протягом 20–30% періодів їх роботи (Perozzi, Mattetti, Molari, & Sereni, 2016). Це свідчить про те, що споживання палива можна зменшити шляхом мінімізації часу простою трактора та максимізації часу, протягом якого трактор працює під навантаженням (Кавалло та ін., 2015).

Існує багато параметрів обробітку ґрунту, які впливають на витрату палива трактором, включаючи структуру та сипучість ґрунту, розмір і форму поля, організацію руху агрегати при виконанні механізованих технологічних

операцій, тип приводу трактора (двох або повний привід), розміри трактора та співвідношення між зчепленнями та трактором (Damanauskas and Janulevičius, 2015, Janulevičius et al., 2018, Karparvarfard and Rahmani-Koushkaki, 2015, Van linden and Herman, 2014). Раціональний вибір параметрів трактора та сільськогосподарського знаряддя на основі польових операцій не тільки підвищує ступінь його завантаження, але й зменшує споживання палива (Janulevičius et al., 2013, Juostas and Janulevičius, 2014, Lovarelli and Bacenetti, 2017). Типова операція у полі включає основну продуктивну операцію, тобто оранку на основній частині поля, а також додаткові операції, такі як поворот комбінації трактор-навісне обладнання на поворотній смузі та в перехідних фазах (Backman et al., 2015, Seyyedhasani and Dvorak, 2018). Розворот комбінації трактор-навісне обладнання на поворотній смузі зазвичай відбувається на низькій швидкості руху з низькими обертами двигуна та малим навантаженням на двигун (Lovarelli, Bacenetti, & Fiala, 2017). Режим роботи двигуна під час повороту на поворотній смузі класифікується як робота двигуна трактора на холостому ході (Koniuszy et al., 2017, Lovarelli et al., 2017, Sabelhaus et al., 2013). Перехідні режими між продуктивною роботою на основній частині поля та розворотом на розворотах дуже короткі, до кількох секунд (Koniuszy et al., 2017, Sabelhaus et al., 2013). Як і можна було очікувати, двигун трактора працює в умовах різного навантаження та обертів двигуна під час продуктивного обробки ґрунту, розвороту на смузі та перехідних операцій. Дослідження (Imdadul et al., 2017, Pitla et al., 2016, Seyyedhasani et al., 2018) показали, що споживання палива двигуном, що працює на холостому ході, і двигуном, що працює, суттєво та непропорційно відрізняються.

Польова ефективність є мірою продуктивності комбінації трактор-навісне обладнання під час польових робіт і визначається, як співвідношення між виробничою потужністю комбінації трактор-навісне обладнання у реальних польових умовах і теоретичною максимальною продуктивністю. «Ефективність поля» не є постійною величиною, притаманною комбінації трактор-навісне обладнання, а змінюється залежно від розміру та форми поля, схеми роботи поля, схеми маневрів на поворотній смузі та інших умов (Bochtis and Vougioukas, 2008, Lacour et al., 2014). Коли комбінація трактор-навісне обладнання повертає на поворотній смузі, неробочий час залежить від відстані, пройденої під час повороту, і середньої швидкості руху (Bochtis & Vougioukas, 2008). Маневри на розвороті впливають на споживання палива, забруднення вихлопними газами та продуктивність.

Матеріали і методи досліджень. При проведенні теоретичного аналізу застосовувалися методи системного підходу до досліджень кінематики руху; методи систематизації з визначенням характеристик кінематики, зв'язок та взаємовплив між ними; методи оцінки, перевірки, статистичного послідовного аналізу даних, що базуються на математичному моделюванні нелінійного руху польових агрегатів з використанням теорії диференціальних рівнянь вищої математики; абстрагування – обґрунтування основних параметрів у результаті

теоретичного аналізу параметричних рівнянь координат центру тяжкості трактора з передніми керованими колесами криволінійного руху.

Результати. Ефективність роботи машинного агрегату (МА) визначається агротехнічними, енергетичними та екологічними показниками трактора та сільськогосподарських машин, правильністю підбору, правильним агрегуванням, налагодженням їх та вибором раціональних режимів їх роботи. Одним з основних режимів роботи є: швидкість руху; величина завантаження двигуна. На швидкісний режим роботи впливають такі фактори, як агротехнічні вимоги до технологічної операції, потужність двигуна та умови виконання технологічної операції. Завдання агрегування зводиться до знаходження оптимального швидкісного режиму роботи, з урахуванням наведених вище факторів (Ільченко, 1996).

Оптимальне агрегування – це поєднання робочої швидкості і конструктивних особливостей МА, при якому забезпечується економний режим роботи трактора в зоні максимального значення тягового ККД з використанням потужності біля 90%.

Одним із найважливіших показників функціонування того чи іншого машинно-тракторного агрегату є продуктивність його роботи ($\omega_{зм}$, (га/год.). Для її визначення найчастіше використовують наступну загальновідому формулу (Ільченко, 1996, Надикто, 2019, Оласюк, 2016, Барабаш, 2014, Бендера, 2013, Шуляк, 2023, Мельник, 2022):

$$\omega_{зм} = 0,1 B_p V_p \tau, \quad (1)$$

де V_p – робоча швидкість агрегату, (км/год.); B_p – робоча ширина захвату МТА, (м); τ – коефіцієнт використання часу зміни машинно-тракторного агрегату;

При розв'язанні проблеми збільшення продуктивності роботи агрегату ($\omega_{зм}$) одні дослідники віддають перевагу підвищенню швидкості руху МА (Ільченко, 1996, Надикто, 2011, Адакчук, 2016), інші – збільшенню його робочої ширини захвату (Ільченко, 1996). Є дослідження, у яких науковці вбачають перспективу у одночасній зміні (збільшенні) параметрів V_p і B_p .

Цілком зрозуміло, що поза увагою наукової спільноти не залишилось питання зростання продуктивності роботи МА шляхом удосконалення процесу організації його роботи (Ільченко, 1996, Надикто, 2008), яке у виразі (1) однозначно репрезентує коефіцієнт τ .

Водночас, практично усі науковці обмежують свою задачу установленням оптимальних значень швидкості руху (V_p) і ширини захвату (B_p) машинно-тракторного агрегату. Але ж аналіз виразу (1) показує, що величина $\omega_{зм}$ оптимуму не має. Звідси виходить, що для установлення перспектив збільшення продуктивності роботи МА потрібен інший методичний підхід – зменшення довжини холостого переміщення на поворотних полосах.

Вибір робочої швидкості МА V_p , (км/год.).

Робоча швидкість повинна бути в межах агротехнічно допустимого діапазону швидкостей для конкретного агрегату і конкретної технологічної операції (в межах 8–12 км/год.), забезпечуватись потужністю двигуна енергетичного засобу та відповідною передачею (Матвієнко, 2018, Барабаш, 2014, Бендера, 2013):

$$V_p = V_T \left(1 - \frac{\delta}{100} \right), \quad (2)$$

де V_p – робоча швидкість агрегату, (км/год.); V_T – теоретична швидкість руху на даній передачі, (км/год.); δ – буксування рушіїв на вибраних передачах, %.

Питомий опір робочих машин при певній робочій швидкості, k , (кН/м):

$$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0) \right], \quad (3)$$

де Δk – темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату на 1 км/год., %; $\Delta k = 2...4$ % темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату вище 5 км/год. на 1 км/год.

Загальний опір робочої машини в складі агрегату, R_a (кН):

$$R_a = \sum_{i=1}^{s=n} R_{a_i} = k B_k n + G_m \left(f + \frac{i}{100} \right), \quad (4)$$

де B_k – конструктивна ширина захвату однієї робочої машини; n – кількість робочих машин в агрегаті; G_m – вага сільськогосподарської машини, кН; f – коефіцієнт опору перекочування сільськогосподарських машин для свіжозораного поля; i – схил місцевості, %.

Коефіцієнт використання тягового зусилля $\eta_{зак}$ на вибраних передачах:

$$\eta_{зак} = \frac{R_a}{P_{зак}}, \quad (5)$$

де $P_{зак}$ – тягове зусилля трактора на вибраних передачах, кН.

Коефіцієнт використання часу зміни τ в продуктивності агрегату за одиницю змінного часу (Льченко, 1996, Оласюк, 2016, Барабаш, 2014, Бендера, 2013, Ружицький, 2010, Сенчук, 2010, Мельник, 2022):

$$\tau = \frac{T_p}{T_{зм}}, \quad (6)$$

де T_p – час чистої (основної) роботи, год.; $T_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Кількість циклів за зміну, n_u :

$$n_u = \frac{T_{зм} - \sum T_{нц}}{t_u}, \quad (7)$$

де $\sum T_{нц}$ – сума позациклових простоїв за зміну, що включає підготовчо – заключний час, час на виконання технічного і технологічного обслуговування агрегатів, час на власні потреби (задається нормативно). $\sum T_{нц} = 0,42$ год.; t_u – тривалість циклу, год.;

Тривалість циклу для агрегатів, що не мають технологічних місткостей дорівнює:

$$t_u = t_p + t_x = \frac{\ell_p}{V_p} + \frac{\ell_x}{V_x}, \quad (8)$$

де t_p – час чистої роботи за один цикл, год.; t_x – час виконання холостого повороту, год.; ℓ_p – робоча довжина заїмки, км; ℓ_x – довжина одного холостого повороту, км:

$$\ell_p = L - 2E, \quad (9)$$

де L – довжина поля, м; E – ширина поворотної смуги, м.

При петлевих грушоподібних поворотах:

$$E = 2,8R_n + 0,5d_k + e, \quad (10)$$

де R_n – радіус повороту боронувальних агрегатів: $R_n = 1,0B_k$; d_k – кінематична ширина агрегату, м; e – довжина прямолінійного виїзду агрегату поворотної смуги, м:

$$e = (0,6...1,0)\ell_k = 0,7(\ell_{mp} + \ell_{сop}), \quad (11)$$

де ℓ_k – кінематична довжина агрегату, м.

Після визначення розрахункового значення ширини поворотної смуги E фактичне її значення приймається із умови:

$$E_{оnm} = nB_p \geq E, \quad (12)$$

де n – коефіцієнт кратності ($n = 2, 4 \dots i$).

Середня довжина повороту агрегату ℓ_x , що приходить на один робочий прохід для різних способів руху грушоподібний петлевий поворот:

$$\ell_x = 6R_n + 2e, \quad (13)$$

Коефіцієнт використання робочих ходів ϕ :

$$\phi = \frac{\ell_p}{\ell_p + \ell_x}. \quad (14)$$

Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p , (год.): $T_p = t_p \cdot n_u$, год.

Час поворотів за зміну, T_x , (год.): $T_x = t_x \cdot n_u$, год.

Витрати палива на одиницю площі, $G_{за}$, (кг/га) (Льченко, 1996, Матвієнко, 2018, Оласюк, 2016, Барабаш, 2014, Бендера, 2013, Ружицький, 2010, Сенчук, 2010, Мельник, 2009, Марченко, 2007, Льченко, 2002, Козаченко, 2001, Мельник, 2022):

$$G_{за} = \frac{G_p T_p + G_x T_x + G_{пер} T_{пер} + G_3 T_3}{\omega_{зм} T_{зм}}, \quad (15)$$

де G_p , G_x , $G_{пер}$, G_3 – годинна витрата палива, відповідно, при виконанні технологічного процесу, на поворотах, переїздах, зупинках з працюючим двигуном, кг/год.; T_p , T_x , $T_{пер}$, T_3 – тривалість, відповідно, чистого часу зміни, поворотів, переїздів, зупинок з працюючим двигуном, год.

Аналізуючи всі відомі нам методики розрахунку техніко-економічних показників використання агрегату (Льченко, 1996, Матвієнко, 2018, Оласюк, 2016, Барабаш, 2014, Бендера, 2013, Ружицький, 2010, Сенчук, 2010, Мельник, 2009, Марченко, 2007, Льченко, 2002, Козаченко, 2001) основними показниками ефективності використання польового агрегату являються продуктивність $\omega_{зм}$, τ – коефіцієнт використання часу зміни машинно-тракторного агрегату; витрати палива на одиницю площі $G_{за}$ та коефіцієнт використання робочих ходів ϕ , які безпосередньо або опосередковано залежать від довжини холостого переміщення на поворотних полосах.

На прикладі агрегату New Holland T8050 з зубовою важкою напівпричіпною шлейф-бороною «Соломія» БШН-17 проводилось моделювання для операції боронування (закриття вологи).

Вид руху агрегату – човниковий, розворот – грушоподібний с закритою петлею з наступними параметрами: шириною захвату 17 м і мінімальним радіусом повороту $R = 5,0$ м. Швидкість руху по криволінійній траєкторії $v = 10$ км/год. $\approx 2,78$ м/с. Розрахунок техніко-економічних показників польового агрегату проводився згідно відповідних методик.

Відповідно до наших запропонованих математичних рівнянь центру ваги криволінійного руху польового агрегату (Мельник, 2017) запропонований алгоритм моделювання маневрів енергетичного засобу за допомогою табличного процесора Microsoft Excel. Повний розворот складається з 7 елементів-маневрів:

двох вхідів та виходів з лівого повороту, вхід та вихід з правого повороту, колова траєкторія (правий поворот).

Результат моделювання маневру на прикладі трактора New Holland T8050 з «Соломія» БШН-17 наведений в таблиці 1 та рисунку 1.

Таблиця 1

Змодельована траєкторія розвороту 2 з використанням аналітичних рівнянь (рис. 1) з довжиною $l_n = 120,43$ м

<i>Вхід в лівий поворот</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,12	5,0	0,087	5	0,044	0	0	2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	9,42	0	0	0	0	∞	0	0	9,42	
2	1,0	2,77	9,53	0,04	2,5	0,054	3,11	25,61	2,78	2,77	9,53	
3	2,0	5,50	10,06	0,088	5,0	0,217	12,43	12,81	5,56	5,50	10,06	
<i>Вихід з лівого повороту</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,044	0,0872	5,00	2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	0,087	5,00	0	0	12,81	0	5,50	10,06	
2	1,0	2,74	0,43	0,044	2,50	0,163	9,33	25,61	2,78	8,08	11,08	
3	2,0	5,45	1,05	0	0	0,217	12,44	∞	5,56	10,6	12,26	
<i>Вхід в правий поворот</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	-0,0802	-4,6	-0,04	0	0	2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	10,60	12,26	
2	1,0	2,78	-0,10	-0,04	-2,30	-0,05	-2,86	-27,84	2,78	13,16	13,33	
3	2,0	5,51	-0,59	-0,08	-4,6	-0,20	-11,44	-13,92	5,56	15,84	14,04	
<i>Правий поворот</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	-0,08	-4,6	0	-0,08	-4,6	17,2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	-0,08	-4,60	0	0	-13,92	0	15,84	14,04	
2	5,0	11,15	-7,29	-0,08	-4,60	-0,998	-57,20	-13,92	13,89	28,38	9,53	
3	11,0	9,49	-22,89	-0,08	-4,60	-2,195	-125,84	-13,92	30,56	30,38	-13,51	
4	17,2	-6,17	-26,85	-0,08	-4,60	-3,433	-196,77	-13,92	47,78	16,08	14,04	
<i>Вихід з правого повороту</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	0	0	0,027	-0,0802	-4,60	3				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	-0,08	-5	0	0	-13,92	0	16,08	-13,51	
2	1,5	4,16	-0,77	-0,04	-2,30	-0,225	-12,87	-27,84	4,17	11,96	-12,50	
3	3,0	8,27	-2,00	0	0	-0,299	-17,16	∞	8,33	7,94	-11,05	
<i>Вхід в лівий поворот</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	0,0698	4	0,035	0	0	2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	7,94	-11,05	
2	1,0	2,78	0,09	0,035	2,00	0,043	2,49	32,02	2,78	5,30	-10,16	
3	2,0	5,52	0,52	0,07	4,00	0,174	9,95	16,01	5,56	2,58	-9,61	
<i>Вихід з лівого повороту</i>												
$v, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$R_{\min}, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ рад}$	$\alpha_k, \text{ град}$	$k, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_n, \text{ рад}$	$\alpha_n, \text{ град}$	$t, \text{ с}$				
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,0349	0,0698	4	2				
№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_p, \text{ м}$	$y_p, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	
1	0	0	0	0,070	4,00	0	0	16,01	0	2,58	-9,61	
2	1,0	2,76	0,3463	0,035	2,00	0,130	7,46	32,02	2,78	-0,19	-9,45	
3	2,0	5,49	0,8366	0,000	0,00	0,174	9,95	∞	5,56	-2,97	-9,43	

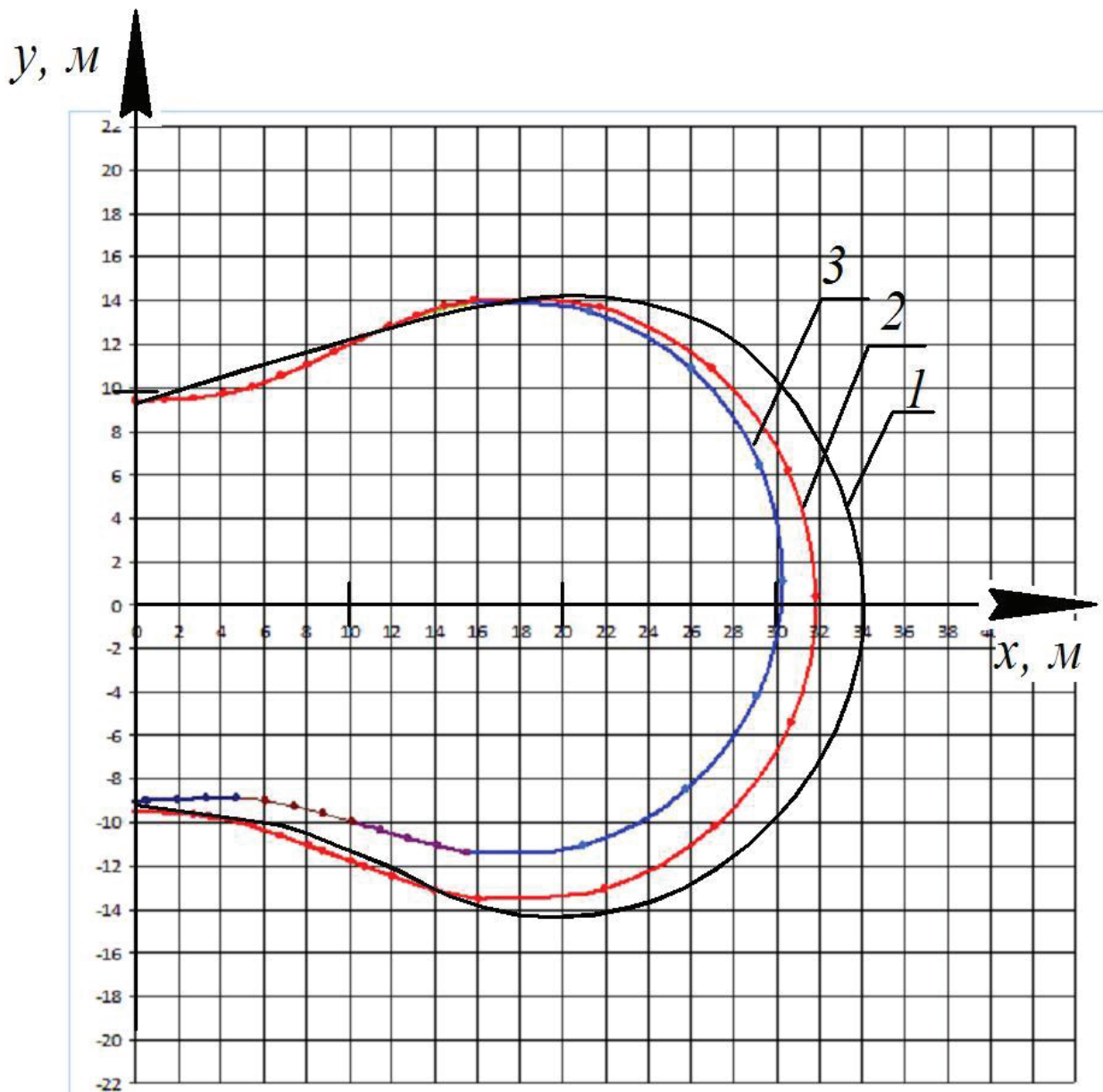


Рис. 1. Ілюстрація запропонованих змодельованих траєкторій петлевидного розвороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 при $u=10$ км/год. $\approx 2,78$ м/с:

1 – експериментальна траєкторія розвороту за допомогою ручного водіння; 2, 3 – оптимізовані траєкторії розвороту

Продуктивність є одним з найважливіших техніко-економічних показників будь-якого агрегату, на підставі якої проводять нормування і планування робіт в аграрному секторі з врахуванням агротехнічних термінів їх виконання, а також розраховують відповідні витрати, включаючи заробітну плату механізаторам і допоміжним робітникам. Виходячи з цього від правильності визначення продуктивності МА в значній мірі залежить ефективність всього аграрного виробництва. Особлива складність і актуальність задачі, що розглядається, полягає у тому, що кожна технологічна операція, пов'язана з виробництвом сільськогосподарської продукції, повинна бути виконана у встановлені агротехнічні строки, відхилення від яких приводить до значного зниження врожаю (Матвієнко, 2018).

Продуктивність польових машинних агрегатів значною мірою залежить від робочої ширини захвату, швидкості руху, номінальної потужності двигуна, тягового зусилля енергетичного засобу, а також від раціонального використання робочого часу. Продуктивність також визначається умовами роботи, зокрема формою та розміром ділянки, глибиною обробки, гранулометричним складом та питомим опором ґрунту, його щільністю та вологістю, рельєфом місцевості, фізіологічними властивостями рослин, об'ємом технологічних місткостей, маневровими властивостями агрегатів, кваліфікацією оператора тощо (Сиволапов, 2016).

Одним з можливих факторів збільшення продуктивності – це оптимізація маневрових властивостей агрегату (зменшення довжини холостого ходу) на поворотах,

що тим саме призводить до збільшення довжини гону та зменшення ширини поворотної смуги. Порівняльна оцінка результатів розрахунку техніко-економічних показників траєкторій розвороту агрегату за допомогою ручного водіння та з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння польових агрегатів наведено в таблиці 2.

Результати розрахунків з таблиці 2 показують, що в результаті зменшення довжини холостого ходу на розворотах польового агрегату, нам вдалося збільшити довжину гону, збільшити коефіцієнт використання робочих ходів φ , збільшити коефіцієнт використання часу зміни t та відповідно збільшується продуктивності за 1 год. змінного часу $\omega_{зм}$.

Обговорення. У роботі Backman (2015) представлено алгоритм для створення плавної траєкторії для маневрування на поворотній смузі, де кривизна та швидкість безперервні. Результати демонструють функціональність алгоритму: два з тестів змінювали кінцеву позу, а два інші змінювали параметри. Алгоритм використовує методи чисельної інтеграції на одній фазі обчислення, але він все одно генерує шляхи за короткий час обчислення.

У роботі Seyyedhasani (2018) сільгоспвиробники прагнуть якомога швидше завершити польові роботи.

Це можливо завдяки одночасному використанню кількох транспортних засобів для операції. Однак розподіл шляху та планування повинні бути розглянуті. Перетворення проблеми польової роботи в задачу маршрутизації транспортного засобу (VRP) і використання процедур оптимізації, розроблених для цієї проблеми, забезпечує метод розподілу шляхів. У цій роботі підтверджено точність представлення VRP польових робіт і перевірено здатність цієї системи оптимізації скорочувати час польових робіт. Нарешті, польову операцію було повторено за оптимізованими маршрутами. При використанні цих маршрутів час виконання польових робіт скоротився на 17,3%, а сумарний час роботи всіх тракторів – на 11,5%. Ці скорочення проілюстрували здатність процедури оптимізації маршруту одним з можливих шляхів покращення ефективної польової продуктивності.

Висновки. В результаті оцінювання економічної ефективності використання змодельованих траєкторій розвороту з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного управління для операції боронування, який досягається за рахунок зменшення палива на розворотах, на посівних площах 1172 тисяч гектар Сумської області складає 11 млн 478 тис. грн.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика траєкторій розвороту польового агрегату за допомогою ручного водіння та змодельованих

Характеристика	Траєкторія розвороту петля 1	Змодельована траєкторія розвороту петля 2	Змодельована траєкторія розвороту петля 3
Довжина петлі l_p , м	123,24	120,43	113,76
Робоча довжина заїмки, l_p , м	492	496	500
Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p (год.)	5,06	5,09	5,17
Час поворотів за зміну, T_x (год.)	1,518	1,481	1,41
Кількість циклів за зміну, n_c	123,14	123,02	123,79
Коефіцієнт використання часу зміни t	0,7232	0,7283	0,7388
Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{зм}$ (га/год)	14,71	14,82	15,03
Витрати палива на одиницю площі, $G_{га}$ (кг/га)	19,68	19,63	19,54
Витрати палива на одиницю площі на поворотах, $G_{га}$ (кг/га)	1,51	1,46	1,37
Витрати на паливо на поворотах, S_n (грн.)	5340,66	5176,8	4850,96
Економічний ефект для посівної площі Сумської області, грн.	–	1 млн. 172 тис. га·3,277грн/га = 3 млн. 840 тис. грн.	1 млн. 172 тис. га·9,794 грн/га = 11 млн. 478 тис. грн.

Бібліографічні посилання:

- Adamchuk V., Bulgakov V., Nadykto V., Ihnatiev Y., Olt J. Theoretical research in to the power and energy performance of agricultural tractors. *Agronomy Research*. 2016. Vol. 14(5). P. 1511–1518.
- Backman J., Piirainen P. Timo Oksanen, Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands, *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 139. P. 76–86. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.08.005
- Barabash H.I., Tatsenko O.V., Bakai R.B. Eksploatatsiia mashyn i obladnannia – [Operation of machines and equipment]. R. 2. Vykorystannia mashyn v mekhanizovanykh tekhnolohichnykh protsesakh : Praktykum shchodo vykonannia laboratorno-praktychnykh robit dlia studentiv 4-ho kursu spetsialnosti 6.100102 "Protsesty, mashyny ta obladnannia ahropromyslovoho vyrobnytstva" dennoi ta zaочноi formy navchannia / SNAU. Sumy, 2014. 135 p. [in Ukrainian]
- Bendera I.M., Hrubyi V.P., Rozdorozhniuk P.I. ta in. Eksploatatsiia mashyn i obladnannia – [Operation of machines and equipment]: navchalno-metodychnyi kompleks : navch. posibnyk dlia studentiv inzhenernykh spetsialnostei osv.-kvalif. rivnia "Bakalavr". Kamianets-Podilskyi, 2013. 576 p. [in Ukrainian]

5. Bietresato M., Calcante A., Mazzetto F. A neural network approach for indirectly estimating farm tractors engine performances. *Fuel*. 2015. Vol. 143. P. 144–154. doi: 10.1016/j.fuel.2014.11.019
6. Bochtis D.D., Vougioukas S.G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 101(1). P. 1–12. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.06.008
7. Cavallo E., Ferrari E., Coccia M. Likely Technological Trajectories in Agricultural Tractors by Analysing Innovative Attitudes of Farmers (May 6, 2015). *Int. J. Technology, Policy and Management*. 2015. Vol. 15(2). P. 158–177. doi: 10.1504/IJTPM.2015.069203
8. Damanauskas V., Janulevičius A. Differences in tractor performance parameters between single-wheel 4WD and dual-wheel 2WD driving systems. *Journal of Terramechanics*. 2015. Vol. 60. P. 63–73. doi: 10.1016/j.jterra.2015.06.001
9. Ilchenko V.Yu., Kobets A.S., Melnyk V.P. ta in. *Praktykum z vykorystannia mashyn v roslynnytstvi – [Workshop on the use of machines in crop production] : navch. posibnyk. Dnipropetrovsk : Redaktsiino-vydavnychiy viddil Dnipropetrovskoho derzhahrouniversytetu, 2002. 212 p. [in Ukrainian]*
10. Imdadul H.K., Masjuki H.H., Kalam M.A. Zulkifli N.W.M., Kamruzzaman M., Shahin M.M., Rashed M.M. Evaluation of oxygenated n-butanol-biodiesel blends along with ethyl hexyl nitrate as cetane improver on diesel engine attributes. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 928–939. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.140
11. Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Tractor's engine performance and emission characteristics in the process of ploughing. *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 75. P. 498–508. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.052
12. Janulevičius A., Damanauskas V., Pupinis G. Effect of variations in front wheels driving lead on performance of a farm tractor with mechanical front-wheel-drive. *Journal of Terramechanics*. 2018. Vol. 77. P. 23–30. doi: 10.1016/j.jterra.2018.02.002
13. Juostas A. & Janulevičius A. Tractor's engine efficiency and exhaust emissions' research in drilling work. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2014. Vol. 22(2). P. 141–150. doi: 10.3846/16486897.2013.852556
14. Karparvarfard S.H., Rahmiani-Koushkaki H. Development of a fuel consumption equation: Test case for a tractor chisel-ploughing in a clay loam soil. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 130. P. 23–33. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.11.015
15. Koniuszy A., Kostencki P., Berger A., Golimowski W. Power performance of farm tractor in field operations. *Eksplatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2017. Vol. 19(1). P. 43–47. doi: 10.17531/ein.2017.1.6
16. Kozachenko O.V., Sychov I.P., Sorokin S.P. ta in. *Praktykum z tekhnichnoi ekspluatatsii silskohospodarskoi tekhniki – [Workshop on technical operation of agricultural machinery] / KhDTUSH. Kharkiv : Tornado, 2001. 374 p. [in Ukrainian]*
17. Lacour S., Burgun C., Perilhon C., Descombes G., Doyen V. A Model to assess tractor operational efficiency from bench test data. *Journal of Terramechanics*. 2014. Vol. 54. P. 1–18. doi: 10.1016/j.jterra.2014.04.001
18. Limont A.S., Melnyk I.I., Malynovskyi A.S. ta in. *Praktykum iz mashynovykorystannia v roslynnytstvi – [Workshop on machine use in crop production] : navch. posibnyk dlia studentiv VNZ. Kyiv : Kondor, 2009. 284 p. [in Ukrainian]*
19. Lovarelli D., Bacenetti J. Bridging the gap between reliable data collection and the environmental impact for mechanised field operations. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 160. P. 109–123. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.002
20. Lovarelli D., Bacenetti J., Fiala M. Effect of local conditions and machinery characteristics on the environmental impacts of primary soil tillage. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 140(2). P. 479–491. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.011
21. Lovarelli D., Fiala M., Larsson G. Fuel consumption and exhaust emissions during on-field tractor activity: A possible improving strategy for the environmental load of agricultural mechanisation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 151. P. 238–248. doi: 10.1016/j.compag.2018.06.018
22. Marchenko V.V. Mekhanizatsiia tekhnolohichnykh protsesiv u roslynnytstvi – [Mechanization of technological processes in crop production] : navchalnyi posibnyk. Kyiv : Kondor, 2007. 334 p. [in Ukrainian]
23. Mashynovykorystannia v zemlerobstvi – [Machine use in agriculture] / V.Iu. Ilchenko ta in. ; za red. V.Iu. Ilchenka, Yu.P. Nahimoho. Urozhai, 1996. 384 p. [in Ukrainian]
24. Matvienko O.O., Krylov O.V. *Metodychni vkazivky do vykonannia praktychnykh zaniat z kursu "Teoretychni osnovy ekspluatatsii silskohospodarskoi tekhniki" – [Methodical instructions for the implementation of practical classes from the course "Theoretical bases of operation of agricultural machinery"] : dlia studentiv spetsialnosti 208 "Ahroinzheneriia", spetsializatsii "Tekhnichniy servis" OKR mahistr. Kropyvnytskyi : TsNTU, 2018. 105 p. [in Ukrainian]*
25. Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B., Solarov O., & Sirenko Y. Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3(7(87)). P. 59–65. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101335
26. Melnyk V.I., Artomov M.P., Anikieiev O.I., Sirovytskyi K.H., Chyhyryna S.A. Mashynovykorystannia v suchasnomu zemlerobstvi – [Machine use in modern agriculture] : metod. vkazivky № 1, 2 dlia vykonannia prakt. robit studentam pershoho (bakalavrskoho) rivnia vyshchoi osvity dennoi (zaochnoi) formy navch. OPP "Ahroinzheneriia" spets. 208 Ahroinzheneriia / Kharkiv. der. biotekh. un-t. Kharkiv, 2022. 75 p.
27. Nadykto V.T., Didur V.A., Fedorenko V.V. Vplyv biodyzelia na ekspluatatsiini pokaznyky roboty MTA – [The impact of biodiesel on the performance indicators of MTA]. *Tekhnika APK*. 2008. Vol. 1. P. 27–29. [in Ukrainian]
28. Nadykto V.T. Enerhonasychenist traktoriv ta shliakhy yii realizatsii – [Energy saturation of tractors and ways of its implementation]. *Tekhnika i tekhnolohii APK*. 2011. Vol. 9. P. 8–11. [in Ukrainian]
29. Nadykto V.T., Kiurchev V.M., Aiubov A.M. ta in. *Perspektyvy zrostannia produktyvnosti roboty mashynno-traktornoho ahrehatu – [Prospects for increasing the productivity of the machine-tractor unit]. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. 2019. Vol. 8(2). [in Ukrainian]*

30. Olasiuk Ya.V. Eksploatatsiia mashyn i obladnannia. Metodychni vkazivky dlia vykonannia kursovoho proektu dlia studentiv spetsialnosti "Eksploatatsiia ta remont mashyn i obladnannia ahropromyslovoho vyrobnytstva" – [Operation of machines and equipment. Methodological guidelines for the implementation of a course project for students of the specialty "Operation and repair of machines and equipment of agro-industrial production"]. *Liubeshivskiyi tekhnichnyi koledzh Lutskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. Lutsk, 2016. 101 p. [in Ukrainian]
31. Perozzi A., Mattetti M., Molari G., Sereni E. Methodology to analyse farm tractor idling time. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 148(2). P. 81–89. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.05.007
32. Ruzhytskyi M.A., Riabets V.I., Kiiashko V.M. ta in. Eksploatatsiia mashyn i obladnannia – [Operation of machines and equipment] : navchalnyi posibnyk. Ahrarna osvita, 2010. 617 p. [in Ukrainian]
33. Sabelhaus D., Röben F. Lars Peter Meyer zu Helligen, Peter Schulze Lammers, Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres. *Biosystems Engineering*. 2013 Vol. 116(4). P. 399–409. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.08.012
34. Santosh K., Pitla J., Luck D., Werner J., Lin N., Scott A. Shearer, In-field fuel use and load states of agricultural field machinery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 121. P. 290–300. doi: 10.1016/j.compag.2015.12.023
35. Senchuk M.M., Demeshchuk V.A. Osnovy mashynovykorystannia v roslynnytstvi – [Basics of machine use in crop production] : metodychni vkazivky dlia samostiinoi roboty ta laboratorno-praktychnykh zaniat za kredytno-modulnoiui systemoiu navchannia studentiv ahronomichnoho fakultetu. Bila Tserkva, 2010. 85 p. [in Ukrainian]
36. Seyyedhasani H., Dvorak S. Reducing field work time using fleet routing optimization. *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 169. P. 1–10. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.01.006
37. Shuliak M., Mikulina M., Mudryi Ya., Pyrohov V. Vplyv vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ na pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu v roslynnytstvi – [The influence of the use of unmanned aerial vehicles on increasing the efficiency of the technological process in crop production]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya "Avtomobile- ta traktorobuduvannia"*. Kharkiv, 2023. Vol. 12023. P. 133. doi: 10.20998/2078-6840.2023.1.13
38. Syvolopov V., Kyslyi S., Marchenko V. Yak pidvyshchyty produktyvnist mashynnykh ahrehativ – [How to increase the productivity of machine units]. *Tekhnika*. 2016. Vol. 2(91). [in Ukrainian]
39. Van Linden V., Herman L. A fuel consumption model for off-road use of mobile machinery in agriculture. *Energy*. 2014. Vol. 77. P. 880–889. doi: 10.1016/j.energy.2014.09.074

Zubko V.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Sirenko Yu. V., PhD, Assistant Professor, Sumy National Agrarian university, Sumy, Ukraine

Kalnahuz A.M., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Use of the proposed algorithms during the simulation of maneuvers by field units

The productivity of field machine units largely depends on the working width of the grip, speed of movement, nominal power of the engine, the traction force of the vehicle, the ratio of working moves, as well as on the rational use of working time. Productivity is also determined by the working conditions, in particular the shape and size of the site, the depth of cultivation, the volume of technological capacities, the maneuverability of units, the qualification of the operator, etc. One of the productivity improvement reserves includes the kinematic parameter, the coefficient of working strokes φ , which shows the degree of utilization of the total path of the unit in the corral for useful work, and is an important characteristic of the chosen mode of movement, and is the ratio of the total working path of the unit in the corral to the entire distance traveled. The value of the coefficient depends on the size of the processing area (the length of the furrow), the kinematic indicators of the unit – the turning radius, the length of the exit, the width of the unit, the method and speed of movement during turns and entrances. The higher the coefficient φ , the shorter the idle distance of the unit and the higher its productivity. The purpose of the scientific research is the analysis based on the created mathematical model of the curvilinear movement of the center of gravity of the field unit with front steerable wheels, the proposed algorithm of using mathematical equations in parametric form for modeling the trajectories (maneuvers) of energy vehicles using the front axle based on the Microsoft Excel spreadsheet processor. In the analysis of literary sources, methods of theoretical analysis of ways to increase the productivity of machine-tractor units, systematization of parameters, and sequential analysis of characteristics were used. Attempts and ways to increase the productivity of field units have been investigated in many articles by world scientists. This leads to a reduction in the required width of the turning lane, an increase in the length of the furrows, an increase in the productivity of the unit, a significant decrease in the number of damaged plants on the sown turning lanes, and a decrease in the mechanical and technological properties of the soil. In the conclusions of the scientific study, the result of the rational use of the simulated trajectories of curvilinear movement of field units with front steered wheels during the performance of agricultural works with the help of introduced algorithms, which are simpler and suitable for use in practice, is presented.

Key words: maneuvers, performance, machine unit, speed, turn, trajectory, path, simulation, mathematical model, efficiency, precision farming system.