

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-11>

УДК 631.371

В. Т. Надикто, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

І. О. Жокін, аспірант

ORCID: 0009-0007-4711-1540

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВОРОТКОСТІ ТРАКТОРА У СКЛАДІ ТРИМАШИННОГО ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ

Анотація. У даній статті розглянуто динаміку повороткості реверсивно налаштованого трактора у агрегаті з напівнавісною зчіпкою і трьома причіпними зерновими сівалками, дві із яких є боковими, а одна – центральною. Проблемою такого машинно-тракторного агрегату (МТА) є можливість фізичного зіткнення внутрішніх коліс бокових посівних машин із рушіями енергетичного засобу. В напрямку унеможливлення такого перебігу подій слід мати на увазі і враховувати наступне. За збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5 до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. При збільшенні значення коефіцієнта опору коченню з 0,12 до 0,20 (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з 0,26 до 0,44 град., тобто у 1,69 рази. Для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них ($p_{ш}$) має бути якомога меншим. Причому, за більших значень параметра $p_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергетичного засобу є меншою. Центральна причіпна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього. Чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора. За збільшення кута повороту від 5 до 11° зменшення значення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11 до 25°. З огляду на це, зменшення радіуса повороту МТА кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11°.

Ключові слова: сівалка, зчіпка, кут повороту керованих коліс, кут уводу шин, тиск повітря в шинах.

Постановка проблеми. За даними наукових досліджень непродуктивні витрати часу тим чи іншим агрегатом на здійснення поворотів можуть займати до 20 % часу його роботи [1]. Цілком зрозуміло, що це негативно відбивається на експлуатаційно-технологічних показниках функціонування МТА.

З огляду на це пошуки шляхів покращення повороткості того чи іншого МТА були, є і у оглядовому майбутньому залишатимуться досить актуальною проблемою. При цьому, гострота останньої тим більша, чим потенційно вища продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату. Значення цього показника суттєво залежить від робочої ширини захвату [2]. І чим вона більша, тим актуальніше вимальовується потреба підвищення повороткості (маневрності) широкозахватних МТА, до яких відноситься розроблений нами тримашинний (тримодульний) посівний агрегат на основі трактора з реверсивною схемою робочого руху [3].

Аналіз останніх досліджень. Науковій практиці відомі спроби отримання експериментальних факторних статичних математичних моделей у вигляді аналітичних залежностей, які визначають дійсну траєкторію руху колісної машини по деформованій поверхні поворотної смуги поля [4–8]. Ці моделі дають можливість оцінити кінематичні та динамічні характеристики посівного МТА у залежності від таких конструктивних і експлуатаційних параметрів, як швидкість руху, поздовжня база трактора, ширина колії використовуваного енергетичного засобу, кут повороту керованих коліс трактора та ін.

У роботі [9] репрезентований тримодульний посівний комплекс, у якого дві сівалки займають бокове положення, певною мірою наближене до фронтального. Проте, автори описують лише конструкцію посівного машинно-тракторного агрегату. Ні кінематику, ні динаміку його плоско-паралельного руху на поворотній смузі вони не розглядають.

Серед теоретичних розробок практично відсутні ті, які можна застосувати до МТА з можливим набіганням його причіпних машин на колеса трактора під час маневрування на поворотній смузі. Тим більше не розглядався варіант використання реверсивного руху трактора у складі посівного МТА.

Мета дослідження – аналіз впливу конструктивних параметрів тримашинного посівного агрегату на динаміку його поворотності.

Основна частина. Фізичним об'єктом досліджень є машинно-тракторний агрегат у складі орно-просапного трактора, налаштованого на реверсивний хід, напівнавісної зчипки і трьох причіпних зернових сівалок (рис. 1).

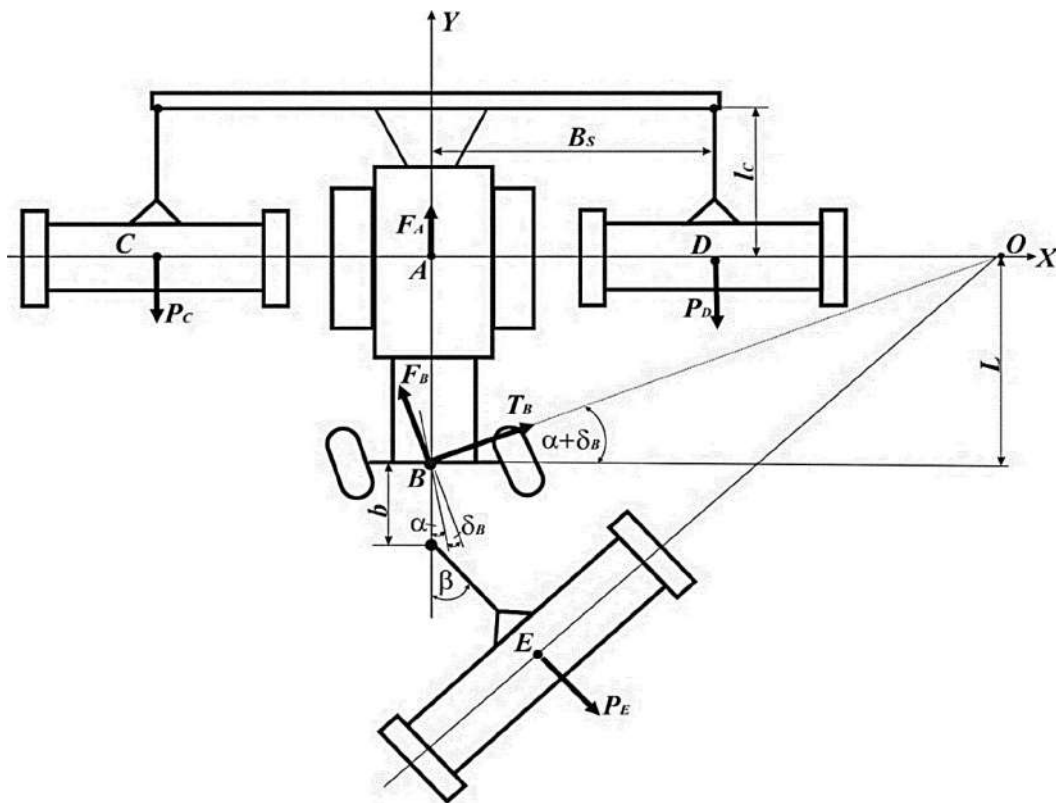


Рис. 1. Схема сил, які діють на МТА у процесі його повороту

У горизонтальній площині проєкцій на досліджуваний МТА під час його повороту відносно центру O діють наступні сили (рис. 1): рушійна (тягова) сила F_A , прикладена в середині переднього мосту трактора (т. A), Н; сила опору коченню лівої сівалки P_C , прикладена в т. C , Н; сила опору коченню правої сівалки P_D , прикладена у т. D , Н; рушійна сила F_B (Н), яка прикладена в середині заднього мосту трактора (т. B) і відхилена від повздовжньої осі трактора на суму кутів уводу шин цього ж моста (δ_B , град.) і повороту його коліс (α , град.); бокова сила T_B , прикладена до середини заднього мосту енергетичного засобу у т. B , Н; сила опору коченню центральної сівалки P_E (Н), яка прикладена у т. E і відхилена від осі симетрії трактора на кут β .

У підсумку система рівнянь рівноваги даного МТА є наступною:

$$\left. \begin{aligned}
 &F_A + F_B \cdot \cos(\alpha + \delta_B) + k_B \cdot \delta_B \cdot \sin(\alpha + \delta_B) - P_E \cdot \cos\beta - P_C - P_D = 0; \\
 &L \cdot [F_B \cdot \sin(\alpha + \delta_B) - k_B \cdot \delta_B \cdot \cos(\alpha + \delta_B)] - P_E \cdot \sin\beta \cdot (L + b) = 0; \\
 &P_C = f \cdot G_C; \\
 &P_D = f \cdot G_C; \\
 &P_E = f \cdot G_C; \\
 &F_A = P_C + P_D + f \cdot N_A; \\
 &F_B = P_E + f \cdot N_B; \\
 &k_B = 58 \cdot N_B \sqrt{\left(\frac{B_K}{D_K}\right)^3} \cdot \left(1.75 - 2.54 \cdot \frac{N_B}{\rho_{ш} \cdot \sqrt{B_K \cdot D_K^3}}\right).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

У системі рівнянь (1) додатково позначені: f – коефіцієнт опору коченню; G_c – сила ваги сівалки, Н; N_A, N_B – вертикальні навантаження мостів трактора, Н; k_B – коефіцієнт опору уводу керованих коліс трактора, Н/рад.; B_K, D_K – ширина шини і діаметр керованих коліс трактор, м; $\rho_{ш}$ тиск повітря в шинах керованих коліс трактора, Па.

Отримана система рівнянь (1) дозволяє установити динаміку кута уводу шин керованих коліс трактора в залежності від кута їх повороту (α), а також від інших конструктивних параметрів посівного МТА. Першою чергою розглянемо природу впливу параметра α на кут уводу шин коліс трактора (рис. 2).

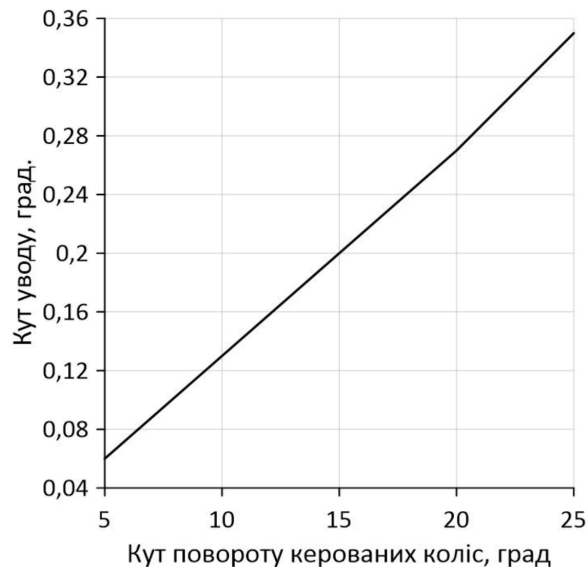


Рис. 2. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від кута їх повороту

Як бачимо, збільшення параметра α бумовлює зростання значення кута δ_B , що у принципі є фактом цілком логічним. Так, за збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5 до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. Залежність $\delta_B = f(\alpha)$ у цьому випадку є лінійною і апроксимується рівнянням виду $\delta_B = 0,014 \cdot \alpha - 0,014$.

Далі розглянемо вплив інших параметрів агрегату на динаміку кута уводу шин керованих коліс трактора. Першою чергою це стосується тиску повітря в шинах керованих коліс трактора (рис. 3).

За даними теоретичних розрахунків збільшення параметра $\rho_{ш}$ бумовлює зменшення кута уводу δ_B . Логіка такого результату полягає у наступному. Як впливає із аналізу останнього

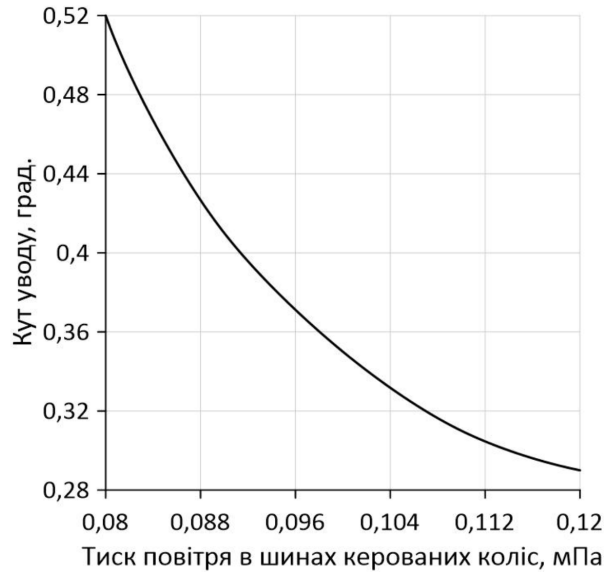


Рис. 3. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від тиску повітря в їх шинах

рівняння системи (1), чим більший тиск повітря в шинах керованих коліс трактора, тим більшим є коефіцієнт опору їх уводу k_B . У цьому випадку незмінне значення бокової сили $T_B = k_B \cdot \delta_B$ можна забезпечити за меншого значення кута уводу δ_B . У підсумку отримуємо, що для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них має бути якомога меншим. При цьому слід мати на увазі, що при більших значеннях параметра $\rho_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергозасобу є меншою.

Дуже цікавим є той факт, що за збільшення значення коефіцієнту опору коченню кут уводу шин керованих коліс трактора теж збільшується (рис. 4).

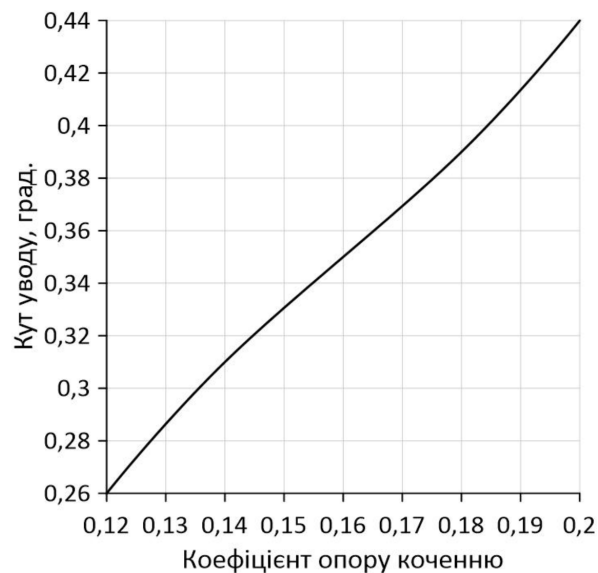


Рис. 4. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від значення коефіцієнта опору коченню

Причому, за інтенсивністю – практично прямопропорційно. У кількісному вираженні це виглядає так: при збільшенні параметра f з 0,12 до 0,20 (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з 0,26 до 0,44 град., тобто у 1,69 рази. Причину цього явища пояснює той факт, що більш твердіший агротехнічний фон характеризується більшою величиною коефіцієнту опору коченню (f) по ньому колісного рушія. А чим твердіший опорний фон, тим менше він деформується під

дією бокової сили (у даному випадку це T_B). Шина поводить себе у цьому випадку навпаки – її деформація у вигляді кута уводу збільшується, що відповідним чином і відображено на рис. 4.

Зазначимо, що центральна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього (рис. 1). Розрахунки показують: чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора (рис. 5).

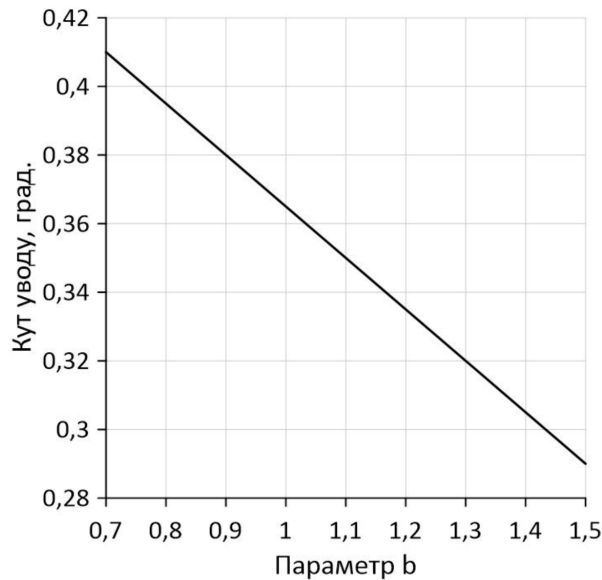


Рис. 5. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від конструктивного параметра b

Справа у тому, що параметр b – це те плече, на якому сила опору коченню посівної машини P_E створює момент відносно точки B . Дія останнього направлена проти напрямку повороту МТА. А це, як впливає із другого рівняння системи (1), зменшує сумарний поворотний момент, зменшуючи при цьому його вплив на формування бокової сили T_B . У підсумку саме це приводить до того, що зі збільшенням значення параметра b кут уводу шин керованих коліс трактора зменшується.

Одним із найбільш важливих конструктивних параметрів будь-якого МТА, як уже підкреслювалося у першому розділі даної роботи, є радіус його повороту. Як засвідчують результати теоретичних досліджень, збільшення значення параметра α обумовлює зменшення параметра R_a (рис. 6). У принципі такий результат є цілком логічним. Хоча інтенсивність цього процесу не однакова у діапазоні змін значень кута повороту керованих коліс трактора. З допомогою методики, викладеної у [10], встановлено, що за збільшення кута повороту від 5 до 11° (точка A , рис. 6) зменшення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11 до 25° .

З огляду на це можна дійти до висновку, що під час руху агрегату на поворотній смузі кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11° . Такий режим його повороту буде здійснюватися з меншим радіусом, що є результатом бажаним.

Висновки. За збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5 до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. Залежність $\delta_B = f(\alpha)$ у цьому випадку є лінійною і апроксимується рівнянням виду: $\delta_B = 0,014 \cdot \alpha - 0,014$.

При збільшенні значення коефіцієнта опору коченню з $0,12$ до $0,20$ (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з $0,26$ до $0,44$ град., тобто у 1,69 рази. Причина цього явища полягає в тому, що чим твердіший опорний фон, тим менше він деформується під дією бокової сили і тим більше це здійснює шина.

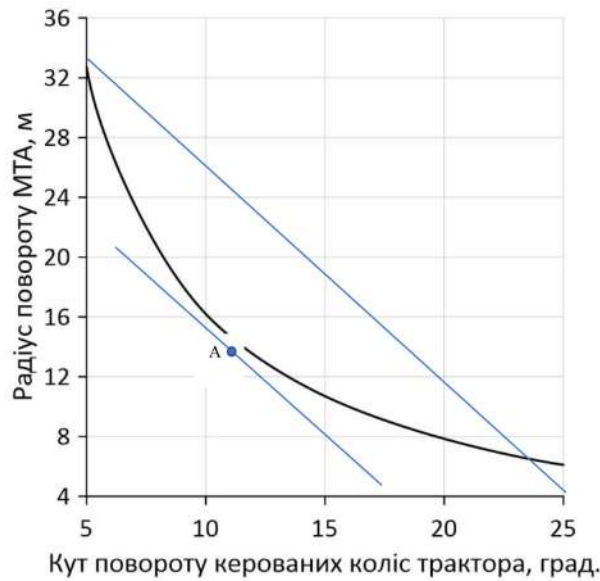


Рис. 6. Залежність радіуса повороту МТА від кута повороту керованих коліс трактора

Доведено, що для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них ($\rho_{ш}$) має бути якомога меншим. При цьому слід мати на увазі, що за більших значень параметра $\rho_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергетичного засобу є меншою.

Центральна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього. Розрахунки показують, що чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора.

За збільшення кута повороту від 5 до 11° зменшення значення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11 до 25°. З огляду на це можна дійти до висновку, що під час руху агрегату на поворотній смузі кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11°. Такий режим повороту буде здійснюватися з меншим радіусом.

Список використаних джерел

1. Yatskul A., Lemiere J.-P., Delion C. On an automated headland turn of wide width air seeders. *RHEA-2014 (Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry)*. Madrid, 2014. № 1. P. 2–9.
2. Надикто В., Кюрчев В. Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегата. *Техніка і технології АПК*, 2018. № 7. С. 26–31.
3. Findura P., Kolarova K., Nadykto V. et al. Turning research of a sowing unit based on reversible tractor. *Acta Technologica Agriculturae*, 2024. V. 4. P. 194–202.
4. Oksanen T., Visala A. Optimal Control of Tractor-Trailer System in Headlands. *ASAE International Conference of Automation Technology for Off-road Equipment*. Kyoto, Japan, 2004. P. 255–263.
5. Oksanen T. Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. *Helsinki University of Technology*, 2007. P. 1–112.
6. Bochtis D. D., Vougioukas S. G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystem Engineering*, 2008. Vol. 101, № 1. P. 1–12.
7. Boryga M. Trajectory Planning for Tractor Turning Using the Trigonometric Transition Curve. *Agric. Eng.* 2023. Vol. 27, № 1. P. 203–212.
8. Trendafilov K. Theoretical determination and analysis of the length of the non-working move and of the width of the headland when performing a fishtail turn with a curvilinear reverse move by a machine-tractor unit with a mounted machine in an irregularly shaped field. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1031, 1.
9. Krasovskikh B. C. et al. Seeding combine as a means of increasing the efficiency of sowing grain crops. *Bull. Altai State Agrarian University*, 2012. Vol. 7, № 93. P. 74–79.



10. Надикто В. Т., Величко О. В. Означення точки оптимуму кривої та спосіб її визначення. *Техніка і технології АПК*, 2014, № 2. С. 16–18.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Nadykto, I. Zhokin
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

STUDY OF TRACTOR TURNABILITY IN A THREE-MACHINE SEEDING UNIT

Summary

This article examines the maneuverability of a reversible tractor in a unit with a semi-mounted hitch and three trailed grain seeders, two of which are side-mounted and one is central-mounted. The problem of such a machine-tractor unit (MTU) is the possibility of physical collision of the inner wheels of the side seeders with the engines of the power tool. To prevent such a course, the following should be kept in mind. With an increase in the angle of rotation of the steered wheels of the tractor by 5 times (from 5 to 25°), the value of the angle of entry of their tires increases by 6 times. With the rolling resistance coefficient increasing from 0.12 to 0.20 (by 1.67 times), the tire entry angle increases from 0.26 to 0.44 grad (by 1.69 times). To reduce the angle of entry of the tires of the steered wheels of the tractor, the air pressure in them (ρ_w) should be as small as possible. Moreover, with larger values of the parameter ρ_w , the intensity of its influence on the angle of entry of the tires of the steered wheels of the power tool is smaller. The central trailed seeder is connected to the tractor's steered wheels at a distance b from the axle. The greater the value of this parameter, the smaller the angle of entry of the tires of the steered wheels of the tractor. With an increase in the angle of rotation from 5 to 11°, the decrease in the value of the turning radius of the MTA is carried out more intensively than with an increase in the parameter α from 11 to 25°. Given this decrease in the turning radius of the MTA, the angle of rotation of the steered wheels should be greater than 11°.

Keywords: seeder, hitch, angle of rotation of the steered wheels, angle of entry of tires, air pressure in tires.