https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-20
УДК 63.211.2:631.3

ПАЛАДІЙЧУК ЮРІЙ
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0003-4257-9383
e-mail: rewet@vsau.vin.ua
ТЕЛЯТНИК ІННА
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0002-2998-1506
e-mail: inna201098@gmail.com
СТЕЦЮК ПАВЛО
Вінницький національний аграрний університет
e-mail: stetsiyk.pavel@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРА ГРАБЛІВ-ВОРУШИЛОК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗГРІБАННЯ ТРАВИ

У роботі також буде проведено розрахунок параметрів траєкторій руху граблин, що дозволить визначити умови для забезпечення безперервного процесу згрібання трави, без пропусків між суміжними траєкторіями.

Ключові слова: ворушіння, згрібання, сіно, кінематика, конструктивні характеристики, граблі.

PALADIYCHUK YURIY, TELYATNIK INNA, STETSYUK PAVLO
Vinnytsia National Agrarian University

SUBSTITUTION OF KINEMATIC AND DESIGN CHARACTERISTICS OF THE ROTOR OF RAKE-TEDDERS TO ENSURE EFFECTIVE GRASS RAKING

The paper considers the technological aspects of haymaking with a special emphasis on the processes of stirring and raking mowed grass, which are important stages for ensuring high quality forage. Particular attention is paid to the kinematic and design characteristics of the tedder rotor, since it is these parameters that determine the efficiency of the working elements of the machine and affect the speed and uniformity of grass drying.

In particular, the paper analyzes the relationship between the kinematic parameters of the rake movement and the design characteristics of the rotor, which is the basis for optimizing the operation of agricultural machinery. The influence of the trajectories of the end points of the rake fingers on the quality of the grass raking process is assessed, and the projections of these trajectories onto the coordinate plane are also considered, which allows determining the time required to achieve the maximum values of the points' movement.

As a result of the study, it was found that the efficiency of stirring and raking grass largely depends on the correct coordination of the design and kinematic parameters of the machines. Conditions for ensuring continuous raking of grass without gaps between trajectories have been determined, which guarantees the quality and productivity of work.

The results obtained allow improving the design of rake-tedders with centrifugal working bodies, taking into account their kinematic and structural characteristics. This can significantly increase the efficiency of agrotechnical processes of hay harvesting and reduce the cost of time and resources, which is an important aspect for farmers working on large areas of agricultural land. The use of such approaches also allows ensuring stable hay quality and reducing nutrient losses during drying, which contributes to increasing the overall productivity of agriculture.

Keywords: stirring, raking, hay, kinematics, design characteristics, rake.

Стаття надійшла до редакції / Received 12.04.2025
Прийнята до друку / Accepted 27.04.2025

Постановка проблеми

Одним із головних типів кормів у зимових раціонах худоби є сіно, яке містить усі поживні елементи, необхідні для повноцінного харчування. Для заготівлі сіна використовують багаторічні, однорічні та злакові кормові культури в чистому вигляді, їхнє насіння, а також травостій природних покращених кормових угідь, які скошені не пізніше періоду масового цвітіння бобових і до початку цвітіння злакових культур [1-4].

Для отримання якісного сіна важливо правильно організувати збирання. Поживність трав залежить від фази розвитку під час скошування: чим пізніше, тим менше корисних речовин і гірша засвоюваність. Худоба краще їсть сіно, заготовлене на ранніх стадіях росту. Важливим фактором є і швидке сушіння, що зменшує втрати поживних речовин. Це досягається плющенням, спушуванням і ворушінням трави.

Ворушіння є важливою операцією для забезпечення рівномірного та швидкого сушіння трави. Завдяки ворушінню трава розкладається в прокосах рівним, пухким шаром, що сприяє покращеній аерації та швидшому випаровуванню вологи. Перше ворушіння здійснюється одразу після скошування або безпосередньо після нього, а наступне — в міру підсихання верхнього шару трави [1,2].

Важливим кроком для підвищення ефективності заготівлі сіна є впровадження нових технологічних підходів, що включають розробку сучасних високопродуктивних машин. Ці машини значно наближають процес кормовиробництва до рівня промислових стандартів, підвищуючи

ефективність і зменшуючи витрати. Застосування таких технологій дозволяє значно полегшити роботу аграріїв і забезпечити високу якість кормів.

Природно-кліматичні умови в різних регіонах України створюють певні обмеження для технології заготівлі сіна, що вимагає адаптації методів та використання різних засобів механізації, залежно від місцевих умов [1-4]. Наприклад, у південних регіонах, де більше сонячних днів, процес сушіння можна здійснювати швидше, тоді як в північних районах з більшими дощами та вологою цей процес може бути уповільнений, що вимагає інших підходів і використання додаткових засобів для контролю вологості трав.

Аналіз досліджень та публікацій

Для прискореного висушування трави важливими факторами є ворушіння та своєчасне згрібання маси в валки. Після скошування, протягом перших 3-4 годин сушіння, вологість верхнього та нижнього шарів трави значно відрізняється, що може призвести до нерівномірного сушіння [2-4]. Ворушіння допомагає вирівняти цю різницю, покращуючи аерацію та прискорюючи випаровування вологи.

Особливо ефективні ворушилки з невеликими роторами, які завдяки великій ширині захоплення дозволяють швидко і рівномірно перемішувати траву. Це забезпечує кращу циркуляцію повітря та запобігає утворенню вологих ділянок, що може спричинити втрати поживних речовин та зниження якості сіна [2,3]. Ворушилки такого типу дозволяють не лише рівномірно висушити масу, але й зменшити час, необхідний для завершення процесу сушіння, що є особливо важливим у випадку погіршення погодних умов, наприклад, при загрозі дощу.

Крім того, своєчасне згрібання маси в валки також відіграє важливу роль у процесі сушіння. Валки сприяють кращому випаровуванню вологи завдяки своїй формі та розташуванню, а також дозволяють значно спростити подальшу обробку та збирання сіна. Використання сучасних механізмів для ворушіння та згрібання допомагає аграріям скоротити час на заготівлю сіна та забезпечити більш високоякісну продукцію [3].

Відомі зарубіжні виробники, такі як Kuhn, Claas, Krone, Pöttinger та інші, пропонують широкий асортимент навісних і причіпних машин для ворушіння та згрібання скошеної трави. Ці компанії виготовляють моделі з різною шириною захвату, що дозволяє обрати техніку залежно від масштабів господарства та умов експлуатації.

Для ворушилок діапазон ширини захвату варіюється від 2,2 м (наприклад, фірма SIP, Словенія) до 17,2 м (фірма Kuhn, Франція), що дозволяє здійснювати ефективне ворушіння навіть на великих площах. Щодо валкоутворювачів, їх ширина захвату коливається в межах від 3 м до 19 м, що також дозволяє забезпечити високу продуктивність при згрібанні трави в валки для подальшого збору. Вибір таких машин дозволяє адаптувати процеси заготівлі кормів до різних умов роботи та оптимізувати витрати часу і ресурсів [3-5].

Згрібання трави здійснюється після того, як вологість скошеної маси досягне 40-50 %. Особливу увагу слід приділяти бобовим травам, оскільки при низькому вмісті вологи можуть виникати втрати цінної листової фракції. Щоб зменшити ці втрати, згрібання бобових проводять вранці та ввечері, коли вологість повітря дещо підвищена, а також на знижених обертах двигуна. У разі необхідності згрібання можна проводити й у нічний час.

Окрім вимог до сушіння, операція згрібання має важливе значення для ефективної роботи техніки на етапі підбирання трави. В Україні граблі, що використовуються для цієї операції, мають ширину захвату від 4,2 м до 6,0 м, що дозволяє ефективно виконувати роботи на площах до 50-80 га, формуючи валки з лінійною потужністю 3-4 кг/м [4]. Однак для досягнення кращих результатів бажано використовувати граблі з шириною захвату 12-18 м. Це обумовлено їх більшою продуктивністю та надійністю в процесі роботи.

Ротаційні граблі з робочою шириною 12-18 м дозволяють формувати валки швидше та з меншими витратами часу, що є важливим при роботі на великих площах [4,5]. Такі машини мають модульну конструкцію, зазвичай оснащені трьома чи чотирма роторами, і здатні формувати один або два валки за один прохід. Прикладом таких високоякісних граблів є моделі «Лайнери» фірми Claas та інших відомих виробників. Ці граблі забезпечують високу якість виконання технологічного процесу та надійність роботи на різних етапах заготівлі сіна.

Граблі фірми Kuhn пропонуються з різною кількістю роторов: один, два (з центральним або боковим укладанням валка) і чотири ротори. Завдяки триколісним опорам під роторами ці граблі чудово копіюють поверхню поля, що зменшує втрати при згрібанні трави [4-6]. Конструкція ротора та кількість граблин сприяють високій продуктивності та ефективному укладанню розпушених валків, що забезпечує оптимальне використання кормових трав.

Для забезпечення безперебійної роботи навіть в складних умовах експлуатації, граблі оснащені двоступінчастим редуктором MASTERDRIVE, що гарантує надійність роботи навіть при великих навантаженнях. Крім того, привід ротора не потребує щоденного обслуговування, що значно знижує витрати на технічне обслуговування та підвищує ефективність роботи [5,6].

Щоб ще більше покращити продуктивність, фірма також пропонує граблі з гідравлічним приводом роторів, що дозволяє здійснювати точне та швидке регулювання роботи машини,

підвищуючи її ефективність та зменшуючи час на виконання операцій. Це також забезпечує можливість точного налаштування глибини та швидкості роботи, що важливо для оптимального укладання валків у різних умовах.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: досліджується, кінематичних параметрів руху граблин, що впливають на якість і ефективність процесу обробки скошених трав.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення ключових аспектів агротехнічних вимог, що висуваються до робочих елементів ротора машини, визначимо взаємозв'язок між його кінематичними та конструктивними характеристиками. Для цього звернемося до рисунка 1, на якому схематично представлено ротор [6-8].

Розташуємо початок координат відповідно до схеми на рисунку. Вісь Z спрямовуємо вертикально вгору через центр обода ротора, а вісь Y – у напрямку руху агрегатованої машини.

Граблини ротора, взаємодіючи з трав'яним покривом, виконують складну сукупність рухів: поступальний (лінійний переміщувальний), переносний (разом із ротором) та обертально-відносний (навколо власної осі).

При розгляді функціонування граблин сформулюємо такі допущення:

1. Вважатимемо, що нахил осі ротора відносно вертикальної лінії залишається незмінним.
2. Кутова та лінійна швидкості руху є сталими величинами.
3. Переміщення агрегату відбувається строго прямолінійною траєкторією.

Проаналізуємо проекційні залежності циклоїдних траєкторій, які описують кінцеві точки пальців граблин за вказаних припущень, на координатну площину XOY [6-8].

Зовнішній палець першої граблини, позначений точкою а, у площинній проекції формує криву, що задається у параметричному вигляді наступною системою рівнянь [6]:

$$x_\alpha = R\cos wt \quad (1)$$

$$y_a = Vt + \cos\psi\sin wt \quad (2)$$

де x_a і y_a – координати проекції на осі x та y відповідно, що визначають абсолютне переміщення точки а; V – лінійна швидкість поступального руху агрегату.

Динамічні параметри руху кінцевої точки зовнішнього пальця другої граблини, позначеної як в, описуються наступною системою рівнянь [6]:

$$x_в = R\cos(wt - 2\pi/z) \quad (3)$$

$$y_в = Vt + R\cos\psi\sin(wt/2\pi/z) \quad (4)$$

де $x_в$ і $y_в$ – координати проекцій переміщення точки в на осі x та y відповідно; z – загальна кількість граблин, закріплених на ободі ротора.

Диференціюючи рівняння (1) і (2), визначимо проекції швидкості руху кінцевої точки першої граблини [6-8]:

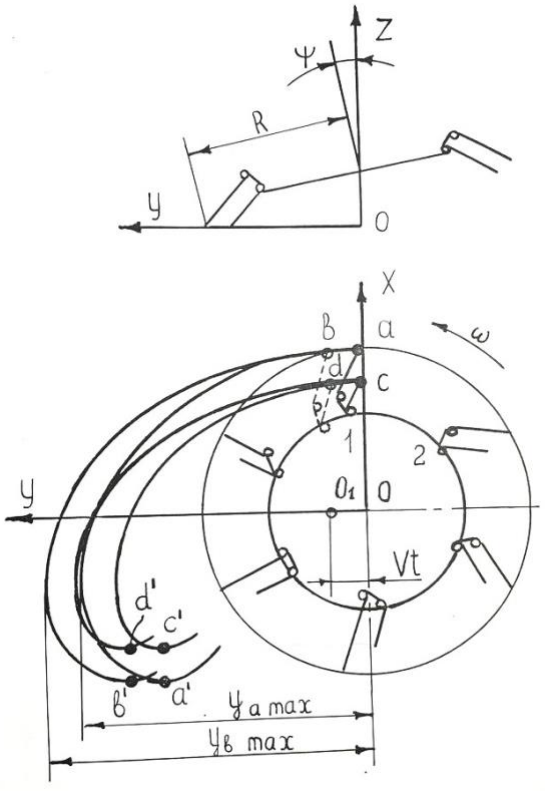

Рис. 1. Схема до обґрунтування параметрів ротора машини

$$dx/dt = -\mathrm{R}w\sin wt \quad (5)$$

$$dy/dt = V + wR\cos\psi\cos wt \quad (6)$$

$$\frac{dx_в}{dt} = -R\,w\sin(wt - 2\pi/z) \quad (7)$$

$$\frac{dy_в}{dt} = V + R\,w\cos\psi + \cos(wt - 2\pi/z) \quad (8)$$

У тих точках траєкторії руху граблин, де ординати досягають своїх максимальних значень, їхні похідні, $d_{ya}/d_{xa} = 0$ і $d_{yв}/d_{xв} = 0$, а саме:

$$(V + R\,w\cos\psi\cos wt) / (-R\,w\sin wt) = 0$$

$$[(V + R\,w\cos\psi\cos(wt - 2\pi/z)] / [(-R\,w\sin(wt - 2\pi/z)] = 0$$

Розв'язавши ці рівняння відносно змінної час Ry, отримаємо аналітичні вирази, що описують залежність параметрів руху граблин у відповідних точках траєкторії [6-8].

$$t_\alpha = 1/w[\pi - arc\cos(\lambda/\cos\psi)] \quad (9)$$

$$t_в = 1/w[\pi - arc\,cos(\lambda/\,cos\,\psi + 2\pi/z)] \quad (10)$$

де t_a і $t_в$ – час необхідний для досягнення точками а і в максимального значення проекцій переміщення; $\lambda = V/wR$ – кінематичний параметр.

Підставивши у рівняння (2) значення часу t_a, отримане з рівняння (9), а у рівняння (4) — значення $t_в$, знайдене з рівняння (10), отримаємо оновлені вирази, що описують кінематичні параметри руху граблин у вибраних точках траєкторії [7].

$$y_{\alpha\,max} = V/w[\pi - arc\cos(\lambda/\cos\psi)] + R\,cos\,\psi\sqrt{1 - (\lambda/\cos\psi)^2} \quad (11)$$

$$y_{в\,max} = V/w[\pi - arc\cos(\lambda/\cos\psi + 2\pi/z)] + R\,cos\,\psi\sqrt{1 - (\lambda/\cos\psi)^2} \quad (12)$$

де $y_{a\,max}$, $y_{в\,max}$ – максимальні значення проекції на площину ХОУ переміщення точок *а* і *в*.

З аналізу розрахункової схеми видно, що перша граблина здійснює захоплення трави з площі *aa'c'c*, а друга – з площі *вв d d*. Відповідно до вимог якісного виконання процесу згрібання, між цими площами в точках траєкторій, які мають максимальні проєкції на вісь у, не повинно залишатися необроблених проміжків. Це означає, що проєкція траєкторії кінцевої точки зовнішнього пальця першої граблини має збігатися з проєкцією траєкторії кінцевої точки внутрішнього пальця другої граблини [7].

Звідси, з достатньою для практичних розрахунків точністю, можна прийняти наступне співвідношення:

$$y_{в\,max} - y_{\alpha\,max} = в$$

Підставивши знайдені значення максимальних проєкцій переміщення точок *а* і *в* граблин у відповідні рівняння, отримаємо аналітичний вираз, що описує необхідну умову для забезпечення безперервного процесу згрібання без пропусків між суміжними траєкторіями.

$$2\pi V/(wz) = в$$

Поділивши R отримаємо:

$$2\pi\lambda/z = d/(R\sin\psi) \quad (13)$$

Одержане рівняння встановлює взаємозв'язок між основними конструктивними та кінематичними параметрами ротора машини. Це дозволяє визначити критичні аспекти роботи робочих органів, що обертаються, і є корисним для аналізу та розрахунків при проектуванні граблів-ворушилок, оснащених відцентровими робочими органами, забезпечуючи їх ефективне функціонування в процесах обробки сільськогосподарських культур [7,8].

Для забезпечення безперервного згрібання трави та ефективного виконання цього процесу в точках траєкторії, де проєкції переміщення досягають максимальних значень, було сформульовано умови, що гарантують відсутність необроблених проміжків між траєкторіями граблин.

Застосування отриманих рівнянь дозволяє точно визначити час, необхідний для досягнення максимальних значень переміщення кінцевими точками пальців граблин, а також встановити взаємозв'язок між конструктивними характеристиками ротора та кінематичними параметрами руху.

Висновки

Для забезпечення ефективної роботи робочих елементів ротора машини було розглянуто взаємозв'язок між його кінематичними та конструктивними характеристиками. Звернули увагу на траєкторії руху кінцевих точок пальців граблин та їх проекції на координатну площину, прийнявши ряд припущень щодо сталості кута нахилу осі ротора, а також лінійних і кутових швидкостей. У результаті побудовано рівняння, що описують рух граблин, зокрема для тих точок траєкторії, де ординати досягають максимальних значень.

Розв'язавши рівняння щодо часу, одержано вирази для максимальних значень проекцій переміщення точок граблин, що дозволяє встановити необхідні умови для забезпечення безперервного процесу згрібання трави, без пропусків між траєкторіями. Це важливо для оптимізації роботи агрегату та забезпечення його ефективності в процесах обробки сільськогосподарських культур.

Отримані результати можна використати для проектування граблів-ворушилок з відцентровими робочими органами, оскільки вони дозволяють врахувати важливі аспекти, що впливають на стабільність і ефективність їх роботи в аграрних процесах.

Література

1. Бахур О. Аналіз конструкцій та результатів досліджень машин для згрібання і ворушіння трав / О. Бахур // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2015. – № 19. – С. 421 – 427.

2. Салюк О. Б. Обгрунтування параметрів робочих органів ротаційних сіноворушилок / О. Б. Салюк // Вісник аграрної науки. – 2019. – № 3. – С. 45 – 50.

3. Сінков П. А. Основи проектування сільськогосподарських машин: навч. посіб / П. А. Сінков. – Вінниця, 2016. – 380 с.

4. Техніка для заготівлі сіна: огляд популярних агрегатів [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://agroelita.info/tekhnika-dlia-zahotivli-sina-ohliad-populiarnykh-ahrehativ/ (дата звернення 30.01.2025).

5. Кондратюк Д. Г. Вплив робочих органів граблів-ворушилок на механічні втрати при заготівлі сіна / Д. Г. Кондратюк, С. О. Солона // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2023. – №2 (121). – С. 116 – 122.

6. Кондратюк Д. Г. Вибір раціональної ширини захвату ротаційних граблів з керованими граблинами / Д. Г. Кондратюк // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2023. – № 1 (120). – С. 40 – 47.

7. Веселовська Н.Р. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування: навч. посіб. / Н. Р. Веселовська, В. С. Руткевич, С. А. Шаргородський. – Вінниця, 2019. – 234 с.

8. Кравець О. М. Вплив кута нахилу граблини на ефективність згрібання сіна ротаційними машинами / О.М. Кравець // Механізація і електрифікація сільського господарства. – 2017. – № 4. – С. 35 – 40.

References

1. Bakhur O. Analiz konstruktsii ta rezultativ doslidzhen mashyn dlia zghribannia i vorushinnia trav / O. Bakhur // Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy. – 2015. – № 19. – S. 421 – 427.

2. 7. Saliuk O. B. Obgruntuvannia parametriv robochykh orhaniv rotatsiinykh sinovorushylok / O. B. Saliuk // Visnyk ahrarnoi nauky. – 2019. – № 3. – S. 45 – 50.

3. Sinkov P. A. Osnovy proektuvannia silskohospodarskykh mashyn: navch. posib / P. A. Sinkov. – Vinnytsia, 2016. – 380 s.

4. Tekhnika dlia zahotivli sina: ohliad populiarnykh ahrehativ [Elektronnyi resurs]. — Rezhym dostupu: https://agroelita.info/tekhnika-dlia-zahotivli-sina-ohliad-populiarnykh-ahrehativ/ (data zvernennia 26.01.2025).

5. Kondratiuk D. H. Vplyv robochykh orhaniv hrabliv-vorushylok na mekhanichni vtraty pry zahotivli sina / D. H. Kondratiuk, S. O. Solona // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2023. – №2 (121). – S. 116 – 122.

6. Kondratiuk D. H. Vybir ratsionalnoi shyryny zakhvatu rotatsiinykh hrabliv z kerovanymy hrablynamy / D. H. Kondratiuk // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2023. – № 1 (120). – S. 40 – 47.

7. Veselovska N.R. Tekhnolohichni osnovy silskohospodarskoho mashynobuduvannia: navch. posib. / N. R. Veselovska, V. S. Rutkevych, S. A. Sharhorodskyi. – Vinnytsia, 2019. – 234 c.

8. Kravets O. M. Vplyv kuta nakhylu hrablyny na efektyvnist zghribannia sina rotatsiinymy mashynamy / O.M. Kravets // Mekhanizatsiia i elektryfikatsiia silskoho hospodarstva. – 2017. – № 4. – S. 35 – 40.