

## Анализ на ширината на ивицата за завиване, дължината на завоите и времето за извършването им от прикачни симетрични земеделски агрегати

**Красимир Трендафилов**

Факултет „Техника и технологии“, Тракийски университет, 8600 Ямбол, ул. Граф Игнатиев 38

E-mail: [trendafilov@outlook.com](mailto:trendafilov@outlook.com)

### Резюме

Оптимизирането на работата на агрегатите е свързано с намаляване на времето за извършване на неработни ходове. Основна част от неработните ходове са завоите, извършвани от агрегатите в ивиците за завиване. Съществуват различни алгоритми, чрез които може да се минимизира времето за извършване на завои, като основна трудност представлява избора на начин на движение и вида на завоя в полета с неправилна форма. Обикновено в тези алгоритми се разглеждат два вида завои – крушовиден и гъбовиден. В настоящата статия са разгледани други три вида завои, които могат да се използват в полета с неправилна форма – удължен крушовиден, скъсен крушовиден и осморкообразен. Посочени са зависимостите за определяне на дължината на завоите и за ширината на ивицата за завиване, необходима за извършването им. Анализирани са дължината и времето за извършване на праволинейната и криволинейната част на завоите. Анализът е направен за положителен ъгъл между направлението на движение на агрегата и ивицата за завиване (ъгълът е от дясната страна на агрегата) в границите от 20° до 90°. Установено е, че скъсените крушовидни завои имат най-малка дължина и време за извършване, като дължината на криволинейната им част е постоянна и не зависи от формата на полето. При малък ъгъл между посоката на движение и границата на полето трябва да се използва скъсен или удължен крушовиден ляв завой, тъй като освен малката си дължина тези завои осигуряват и по-малка ширина на ивицата за завиване. При по-големи стойности на ъгъла трябва да се използва скъсен крушовиден ляв завой, а при най-големите стойности на ъгъла могат да се използват скъсени крушовидни леви и десни завои, тъй като имат еднакви дължини и ивици за завиване.

**Ключови думи:** неработен ход; дължина на завоя; ширина на ивицата за завиване; време за завиване; поле с неправилна форма; прикачни симетрични земеделски машини

## Analysis of the width of the headland, the length of turns and time of their carrying out by trailed symmetrical agricultural units

**Krasimir Trendafilov**

Faculty of Techniques and Technologies, Trakia University, 38 Graf Ignatiev str., 8600 Yambol, Bulgaria

E-mail: [trendafilov@outlook.com](mailto:trendafilov@outlook.com)

### Abstract

Trendafilov, K. (2018). Analysis of the width of the headland, the length of turns and time of their carrying out by trailed symmetrical agricultural units. *Rastenievadni nauki*, 55(4), 62-70 (Bg).

Optimization of work of agricultural aggregates is related to reduction of time for making non-working moves, main part of which are turns made by units in headlands. There are different algorithms that can minimize the time for making turns as the main difficulty is the choice of way of movement and the type of turn in the fields of irregular shape. Usually these algorithms considered two types of curves - pear-shaped ( $\Omega$ -turn) and mushroom-

shaped (fish-tail). This article discusses three other types of turns that can be used in fields with irregular shape - oblong pear-shaped, shortened pear-shaped and eight-shaped. The dependencies for determining the length of turns and the width of headland needed to perform them are listed. Length of turn is the distance traveled by the unit from turning off the machine when it reaches the boundary of the headland until it is turned on for the next working move again at the boundary of the headland. In the dependencies for calculating the length of the turn ( $L_p$ ), the first addend is the length of the curvilinear section of the turn ( $L_c$ ), and the remaining addends form the length of the straight-line section of the curve ( $L_s$ ). The aim of the present work is to analyze width of the headland, length of the turns and time of their execution by agricultural units with trailed symmetrical farm machinery in shuttle movement in the field. The calculations are made for angle  $\alpha$  between the direction of movement of the unit and the boundary of the headland in a variation interval of  $20^\circ$  to  $90^\circ$  only at a positive value on the angle. Angle  $\alpha$  is considered positive when it is on the right side of the unit when it enters the in the headland. All calculations are made for a specific aggregate with working width  $B = 3.6$  m, kinematic length  $la = 3$  m and turning radius  $R = 3.7$  m. In a negative angle, the results are the same, but the direction of the turn is changed. The time for turning is calculated by assuming that in the curvilinear part of the turn the unit moves at a speed of  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  and on the straight-line part with speed  $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . From the analysis we found that shortened pear-shaped turns have the smallest length and the least time to perform. In them the length of the curvilinear part of the turn is constant and the length of the straight-line part decreases with increasing  $\alpha$ . In case of small values of  $\alpha$ , a shortened or oblong pear-shaped left turn should be used, because besides small length they also provide a smaller width of the headland. For larger a values of  $\alpha$ , a shortened pear-shaped left turn should be used, and for the largest values of  $\alpha$ , shortened pear-shaped left and right turns can be used because they have the same lengths and headlands. Eight-shaped turns are not recommended because of their greater length and the relatively larger share of the curvilinear part, which increases the time for carrying out them.

**Keywords:** non-working movement; turn length; headland width; time for turning; field with irregular shape; trailed symmetrical farm machinery

Неработните ходове на земеделските агрегати включват завоите, извършвани от агрегатите в края на полето, ходовете до местата за обслужване на машината (местата за зареждане с торове, препарати, семена или разтоварване на прибраната продукция) и преходите между полетата. Времето за извършване на завоите е в основата на определянето на полския индекс на машините и полската ефективност (Shamshiri et al., 2013). Намалването му ще се отрази положително на ефективността на работата на агрегатите. Това може да се извърши чрез подходящ избор на завой в ивицата за завиване и начин на извършване на работните ходове. При работата в малки полета на машини, които не се нуждаят от обслужване, времето за завой може да се намали до 50% (Spekken and de Bruin, 2013). Времето за завой се изчислява като сума от времето за движение при прав участък и времето за движение по криволинеен участък, като се присвояват съответните скорости на движение в двата вида участъци на завоя (Spekken and de Bruin, 2013).

Много автори предлагат алгоритми за планиране на начина на движение по полето с цел да се намали времето за завиване. Oksanen (2007) използва функция за ефективност, представляваща отношение между работните ходове и сумата от времето за извършване на работни и празни ходове. При определяне на времето за работни и празни ходове скоростта може да варира. Избира се този маршрут на движение, при който функцията е максимална (Oksanen and Visala, 2007).

Планирането на начина на движение на агрегатите се прави основно с цел да се повиши ефективността на тяхната работа – намаляване на непроизводителното време и разхода на гориво. Освен това се намалява и ширината на ивицата за завиване. В нея отъпкването на почвата е най-голямо, което води и до намаляване на добива от тази площ (Bochtis and Vougioukas, 2008). В някои случаи ивиците за завиване се явяват загуба на площ, тъй като не могат да се използват за отглеждане на културите (Cariou et al., 2010).

Системите за прецизно земеделие автоматично поддържат посоката на движение на базата на точно сателитно позициониране. Движението може да се извърши по прави или криви линии като се копира предходния ход на машината. Значително по-висока точност се получава при използване на навигация с RTK корекция, което позволява да се увеличи и скоростта при извършване на завои (Ishpekov et al., 2014). Изборът на вида на завоя в ивицата за завиване се намира ръчно от оператора при използването на съответната система за автоматизирано движение по полето. Преминаването към напълно автоматизирани (безпилотни) земеделски агрегати изисква наличието на алгоритми, които могат да изберат най-подходящата траектория на движение на агрегата в полето и вида на завоя в ивицата за завиване, при които да се постигне максимална ефективност. Този избор се затруднява значително в полетата с неправилна форма. Освен това формата на полето се отразява и върху разхода на гориво, особено при полета с площ над 25 ha (Jílek and Podpěra, 2005).

При някои от съществуващите алгоритми за планиране на движението на земеделските агрегати, ивиците за завиване се генерират автоматично, а при алгоритмите за работа в реално време, времетраенето за завиване и дължините на ходовете се знаят предварително за всички ивици за завиване или се изчисляват много бързо (Oksanen and Visala, 2007). Когато се оптимизира движението по полето, най-важно е да се минимизира времето, прекарано в ивицата за завиване. В някои разработки проблемът за оптималния контрол е решен с фиксирани параметри на агрегата и променливи параметри на ивицата за завиване – ъгъл и ширина (Oksanen and Visala, 2004; Oksanen, 2007).

Предложен е и алгоритъм, който може да определи местата на ивиците за завиване на полета с различна форма, но те се приемат с определена ширина: 9 m за зърнени култури и 12 m за цвекло, царевица и картофи (Aurbacher and Dabbert, 2009).

Оптимизацията на траекторията в ивицата за завиване може да се извърши чрез използване на числени директни методи (Tu, 2013). Пресмята се минималната необходима ширина на ивицата за завиване. Ширината на ивицата се променя в зависимост от ъгъла, който сключва тя с

перпендикуляра на направлението на движение на агрегата. Определя се каква е необходимата ширина на ивицата за завиване при минимално време (Tu, 2013).

При някои алгоритми се разглеждат само два вида завои – крушовиден и разтегнат (движение с пропускане на ходове) (Bochtis and Vougioukas, 2008; Spekken and de Bruin, 2013) или крушовиден и гъбовиден затворен (Cariou et al., 2010; Tu 2013). Това са най-известните завои, като крушовидните се използват при работа с прикачни машини, а гъбовидните с движение на заден ход – при работа с навесни машини. Съществуват и други видове завои, които също биха могли да се използват. Установено е, че при полетата с неправилна форма, видът на завоя се променя, а с това и неговата дължина, както и ширината на ивицата за завиване (Trendafilov, 2011a, 2011b). Следователно, при определени условия е възможно използването на друг вид завои да доведе до по-голяма ефективност при работата на агрегата.

Целта на настоящата работа е да се направи анализ на ширината на ивицата за завиване, дължината на завоите и времето за извършването им от прикачни симетрични земеделски агрегати при совалково движение в полето.

## МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

На Таблица 1 (стр. 66-67) е показан видът на завоите и са обобщени зависимостите за определяне на дължината им и ширината на ивиците, необходими за завиване на агрегатите в края на полето (Trendafilov, 2011a, 2011b). Дължината на завоите се изчислява от точката, в която се изключва машината след края на работния ход, до точката на включване за извършване на следващия работен ход, като това може да се извърши и във вътрешността на самата ивица за завиване, а не на границата ѝ (Trendafilov, 2011a). Това се случва, когато агрегатът не разполага със система за прецизно земеделие и трактористът не може да определи къде точно е границата на ивицата за завиване. По този начин се получава допълнително обработена площ, която след това се обработва втори път при обработването на ивицата за завиване. Когато се използва система за прецизно земеделие, може

предварително да се определи точно местоположението на границата на ивицата за завиване и машината да се изключи при достигането ѝ. По този начин няма да се получава допълнителна двойно обработена площ при работа на агрегата. В зависимостите, посочени на Таблица 1, дължината на завоя е разстоянието, изминавано от агрегата, от изключването на машината при достигане на границата на ивицата за завиване до включването ѝ за следващия ход отново на границата на ивицата за завиване. В зависимостите за изчисляване на дължината на завоя ( $l_p$ ), първото събираемо представлява дължината на криволинейния участък от завоя ( $l_c$ ), а останалите събиратели образуват дължината на праволинейната част от завоя ( $l_s$ ). Разгледани са три вида завоя: удължен крушовиден, скъсен крушовиден и осморкообразен. Изчисленията на дължините им и ширините на ивиците за завиване, необходими за тях, са направени за ъгъл  $\alpha$  между направлението на движение на агрегата и границата на ивицата за завиване, в интервал на изменение от  $20^\circ$  до  $90^\circ$ , само при положителна стойност на ъгъла. Ъгъл  $\alpha$  се приема за положителен, когато е от дясната страна на агрегата при влизането му в завоя (Фигура 1). Всички изчисления са направени за конкретен агрегат, с работна ширина  $B = 3.6$  m, кинематична дължина  $l_a = 3$  m и радиус на завой на агрегата  $R = 3.7$  m. При отрицате-

лен ъгъл резултатите са същите, но се променя посоката на извършване на завоя, съгласно Таблица 1.

Означенията, посочени в таблицата, са със следните значения:

$E$  – ширина на ивицата за завиване;

$l_T$  – дължина на завоя;

$\alpha$  – ъгъл между направлението на движение на агрегата и границата на ивицата за завиване;

$B$  – работна ширина на агрегата;

$l_a$  – кинематична дължина на агрегата;

$R$  – радиус на завой на агрегата.

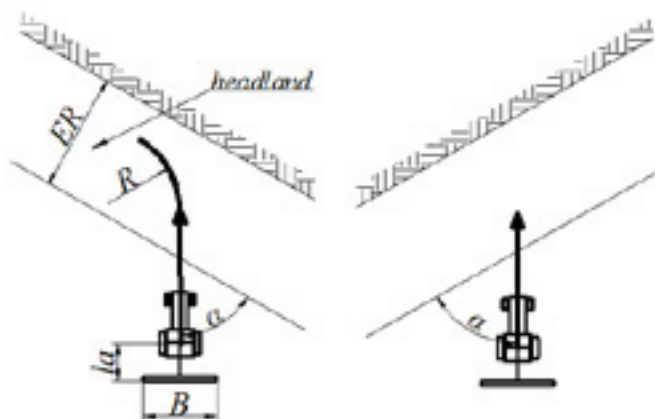
Действителната ширина на ивицата за завиване  $E_R$  трябва да бъде кратна на работната ширина на агрегата

$$E_R = k.B \quad (1),$$

където  $k$  е броя на ходовете на агрегата за обработка на ивицата за завиване.

Броят на ходовете за обработка на ивицата за завиване ще зависи от ъгъл  $\alpha$ . При изравняване на зависимост (1) със зависимостите за  $E$  от Таблица 1, се определя броят на ходовете  $k$  и стойността на ъгъл  $\alpha$ , при който става промяна на ширината на ивицата за завиване.

Времето за извършване на завоите се изчислява, като се приема, че криволинейната част от завоя се изминава със скорост 3 km/h, а праволинейната – със скорост 7 km/h.



Фиг. 1. Движение на агрегата към ивицата за завиване:







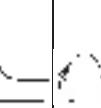
а – при положителен ъгъл между направлението на движение и границата на ивицата за завиване;

б – при отрицателен ъгъл

Fig. 1. Movement of the unit to the headland:

a – with a positive angle between the direction of movement and the headland; b – with a negative angle

**Таблица 1.** Зависимости за определяне на ширината на ивицата за завиване и дължината на завоите на симетрични агрегати  
**Table 1.** Dependencies to determining the width of the headland and the length of the turns of symmetrical units

Вид на завоя/ Shape of turn	Наименование на завоя/ Name of turn	Посока на извършване/ Direction of performance	$\alpha$	Ширина на ивицата за завиване/ Width of headland	Дължина на завоя/ Length of turn
1	2	3	4	5	6
	Удължен крушовиден/ Oblong pear-shaped	Ляв/ Left	+		$l_T = \left( 2\pi + \frac{\pi\beta}{90} \right) R + \frac{2R \sin \beta + B}{\sin \alpha}$
	Удължен крушовиден/ Oblong pear-shaped	Десен/ Right	-		$\beta = \alpha - \arcsin \left( \frac{l_a \sin \alpha}{R} \right)$
	Осморкообразен/ Eight-shaped	Ляв/ Left	+	$E = 0,5B(\cos \alpha + 1) + R(1 - \cos \alpha) + l_a \sin \alpha$	$l_{T1} = \left( 2\pi + \frac{\pi\alpha}{90} \right) R + 2(R + l_a) - \frac{B}{\sin \alpha}$ при / when $\alpha > \arcsin \left( \frac{B}{2R} \right)$
	Осморкообразен/ Eight-shaped	Десен/ Right	-		$l_{T2} = \left( 2\pi + \frac{\pi\alpha}{90} \right) R - 2(R - l_a) + \frac{B}{\sin \alpha}$ при / when $\alpha < \arcsin \left( \frac{B}{2R} \right)$
минимум при/minimum when $\alpha = \arcsin \left( \frac{B}{2R} \right)$					
	Скъсен крушовиден/ Shortened pear-shaped	Ляв/ Left	+	$E = 0,5B(\cos \alpha + 1) + R(1 - \cos \alpha) + (2R - l_a) \sin \alpha$	
	Скъсен крушовиден/ Shortened pear-shaped	Десен/ Right	-		$l_T = 2\pi R + 2(R - l_a) + \frac{B}{\sin \alpha}$
	Скъсен крушовиден/ Shortened pear-shaped	Десен/ Right	+	$E = (0,5B + R)(\cos \alpha + 1) + (2R - l_a) \sin \alpha$	



Скъсен крушовиден/  
Shortened pear-shaped

Удължен крушовиден/  
Oblong pear-shaped

Удължен крушовиден/  
Oblong pear-shaped

Осморкообразен/  
Eight-shaped

Осморкообразен/  
Eight-shaped

Ляв/  
Left

Десен/  
Right

Ляв/  
Left

Десен/  
Right

Ляв/  
Left

-

+

-

+

-

$$l_T = \left( 3\pi + \frac{\pi \cdot \beta}{90} \right) R + \frac{2R \cdot \cos \beta + B}{\sin \alpha}$$

$$\beta = \arccos \left( \frac{l_a \cdot \sin \alpha}{R} \right) - \alpha$$

$$l_{T1} = \left( 4\pi - \frac{\pi \cdot \alpha}{90} \right) R + 2(R + l_a) - \frac{B}{\sin \alpha}$$

$$\text{при / when } \alpha > \arcsin \left( \frac{B}{2R} \right)$$

$$l_{T2} = \left( 2\pi - \frac{\pi \cdot \alpha}{90} \right) R - 2(R - l_a) + \frac{B}{\sin \alpha}$$

$$\text{при / when } \alpha \leq \arcsin \left( \frac{B}{2R} \right)$$

$$E = (0,5B + R)(\cos \alpha + 1) + l_a \cdot \sin \alpha$$

## РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

На Фигура 2 са показани резултатите от изчисленията на дължината на завоите и ширината на ивиците за завиване. Общата дължина  $l_T$  на удължения крушовиден ляв завои (Фигура 2а) е най-голяма при много малки и много големи стойности на ъгъл  $\alpha$ , и е най-малка при средни стойности на  $\alpha$ . Това се дължи на характера на изменение на праволинейната част от завоия, която е най-дълга при малък ъгъл  $\alpha$ , след което намалява и след определена стойност на  $\alpha$  отново се увеличава. Криволинейната част на завоия непрекъснато нараства, т.е. колкото полето се доближава до правилна форма, толкова по-дълъг е криволинейният участък на завоия. Ширината на ивицата за завиване също нараства след определен ъгъл  $\alpha$ . Ако удълженият крушовиден завои се извършва надясно (Фигура 2б), общата му дължина непрекъснато намалява с увеличаване на ъгъл  $\alpha$ . Тя е по-голяма от дължината на левия завои. Двата завоия се изравняват при правилна форма на полето ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Ширината на ивицата за завиване при извършване на десен завои и малък ъгъл  $\alpha$  е два пъти по-голяма, отколкото при левия завои, но при определена стойност на  $\alpha$  те се изравняват. Ъгълът, при който се променя ширината на ивицата за завиване, се определя чрез изравняване на зависимостите за  $E_R$  и  $E$  и преобразуване. При извършване на удължен крушовиден ляв завои

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left( \frac{l_a - \sqrt{l_a^2 - B(k \cdot B - 2 \cdot R)(k - 1)}}{k \cdot B - 2 \cdot R} \right) \quad (2)$$

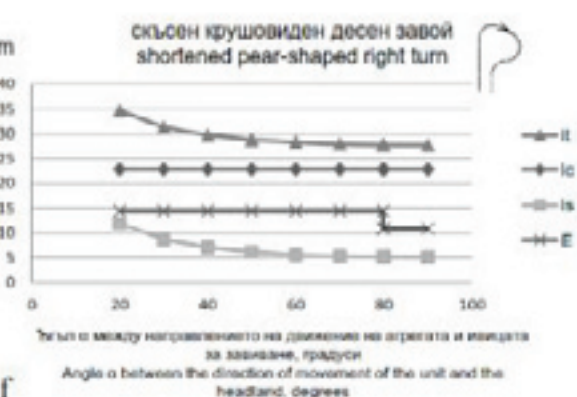
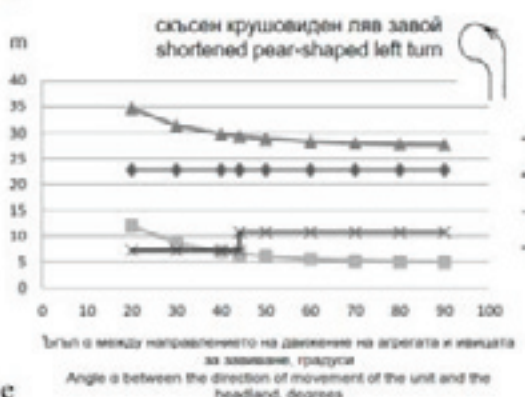
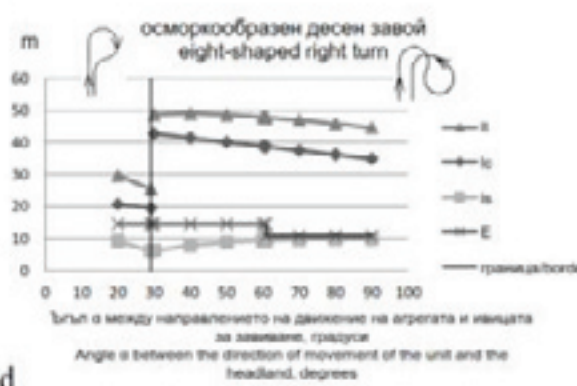
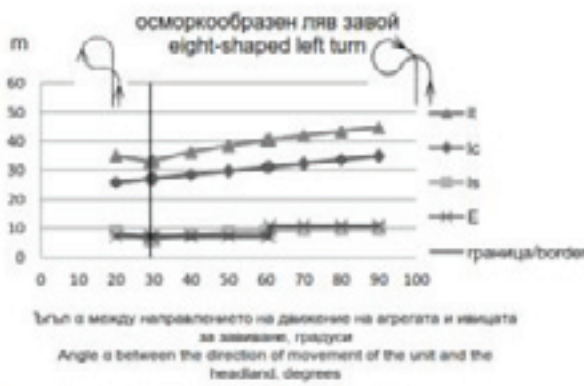
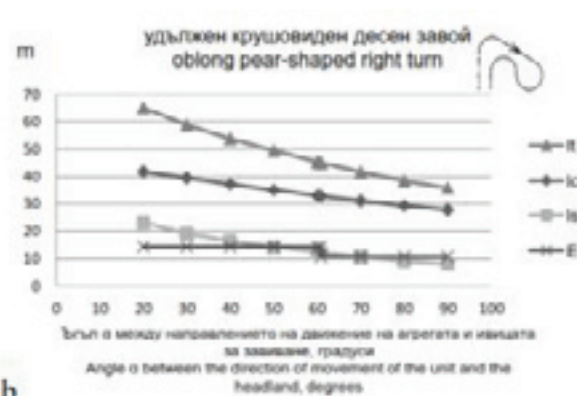
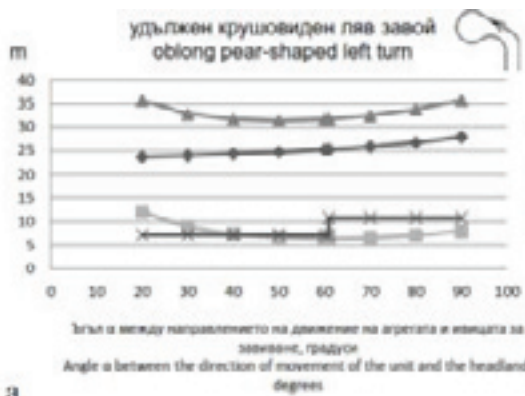
при  $k = 2$ , т. е. ивицата за завиване се обработва за 2 хода при по-малка стойност на ъгъла от изчислената по формулата и за 3 хода при по-голяма стойност на  $\alpha$ .

При извършване на удължен крушовиден десен завои

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left( \frac{l_a + \sqrt{l_a^2 - k \cdot B(k \cdot B - B - 2 \cdot R)}}{k \cdot B} \right) \quad (3)$$

при  $k = 3$ . В случая, при малък ъгъл ивицата за завиване се обработва за 4 хода, а при по-голяма стойност на ъгъла – за 3 хода на агрегата.

Следователно, ако се използва удължен крушовиден завои при поле с неправилна форма, той трябва да се извършва наляво при положи-



Фиг. 2. Дължини на завоите и ширини на ивицата за завиване  
 Fig. 2. Lengths of the turns and widths of headland

телен ъгъл между направлението на движение на агрегата и ивицата за завиване, и надясно – при отрицателен ъгъл. При правилна форма на полето ( $\alpha = 90^\circ$ ), независимо от посоката на извършване на завои, неговата дължина и ширината на ивицата за завиване са едни и същи.

Осморкообразните завои (Фигури 2c и 2d) променят вида си в зависимост от ъгъл  $\alpha$ . Стойността на  $\alpha$ , при която вида на завоите се променя, може да се изчисли по формулите в Таблица

1, а на фигурите тя е показана с вертикална права, като граница между двата завои. Вижда се, че видът на завои се променя при много малка стойност на  $\alpha$ . В този случай е по-добре да се използва десния завои (Фигура 2d), който има по-малка дължина, но два пъти по-широка ивица за завиване. Ширините на ивиците за завиване при осморкообразните завои се определят по същия начин както при удължените крушовидни завои.

От Фигура 2с и Фигура 2d се вижда, че дължината на левия завой нараства с увеличаване на  $\alpha$ , а дължината на десния намалява. Дължините на завоите се изравняват при  $\alpha = 90^\circ$ . Осморкообразните завои имат по-голяма дължина от удължените крушовидни завои и същата ширина на ивицата за завиване. Освен това, относителният дял на криволинейния участък при тях е по-голям, особено при осморкообразния десен завой. Всичко това означава, че и времето за извършване на осморкообразните завои ще бъде по-голямо от това на удължените крушовидни завои.

На Фигури 2е и 2f са показани резултатите за скъсените крушовидни завои. Вижда се, че независимо от посоката на завиване, завоите имат еднакви дължини. Различават се само по ширината на ивицата за завиване. Дължината на криволинейния участък на завоя е постоянна, т. е. не зависи от ъгъл  $\alpha$ , докато дължината на праволинейния участък намалява с увеличаване на  $\alpha$ , което означава, че с доближаване до правилна форма на полето, времето за извършване на този вид завои ще намалява.

Дължината на скъсените крушовидни завои е по-малка от тази на останалите завои, което се дължи на по-късата дължина на криволинейния участък на завоя, а тези участъци се изминават с по-малка скорост, т. е. за по-дълго време. Дължината на праволинейния участък е съизмерима с тази на другите завои при малък ъгъл  $\alpha$ , но при нарастване на  $\alpha$ , дължината му става по-малка в сравнение с другите завои.

Ъгълът, при който става промяна на ширината на ивицата за завиване, се определя по следните зависимости:

- за скъсен крушовиден ляв завой

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left( \frac{2.R - l_a - \sqrt{(2.R - l_a)^2 - B(k.B - 2.R)(k-1)}}{k.B - 2.R} \right) \quad (4)$$

при  $k = 2$ , т. е. при по-малка стойност на  $\alpha$  от изчислената, ивицата за завиване се обработва за два хода, а при по-голяма стойност на  $\alpha$  – за 3 хода.

- за скъсен крушовиден десен завой

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left( \frac{2.R - l_a + \sqrt{(2.R - l_a)^2 - k.B(k.B - B - 2.R)}}{k.B} \right) \quad (5)$$

при  $k = 3$ , т. е. за малък ъгъл  $\alpha$ , ивицата за завиване се обработва за 3 хода, а при по-голям ъгъл  $\alpha$  – за 4 хода.

От Фигури 2е и 2f се вижда, че скъсенят крушовиден ляв завой осигурява по-малка ширина на ивицата за завиване. Само при много високи стойности на  $\alpha$ , ширината на ивицата за завиване е еднаква за двете посоки на извършване на завоя. Следователно, от гледна точка на ширината на ивицата за завиване, скъсенят крушовиден десен завой може да се използва, когато формата на полето е близка до правилната (при голям ъгъл  $\alpha$ ).

На Фигура 3 е показано времето за извършване на удължени и скъсени крушовидни завои. Осморкообразните завои не се разглеждат, тъй като по-голямата им дължина от останалите завои предполага и по-голяма продължителност на извършването им.

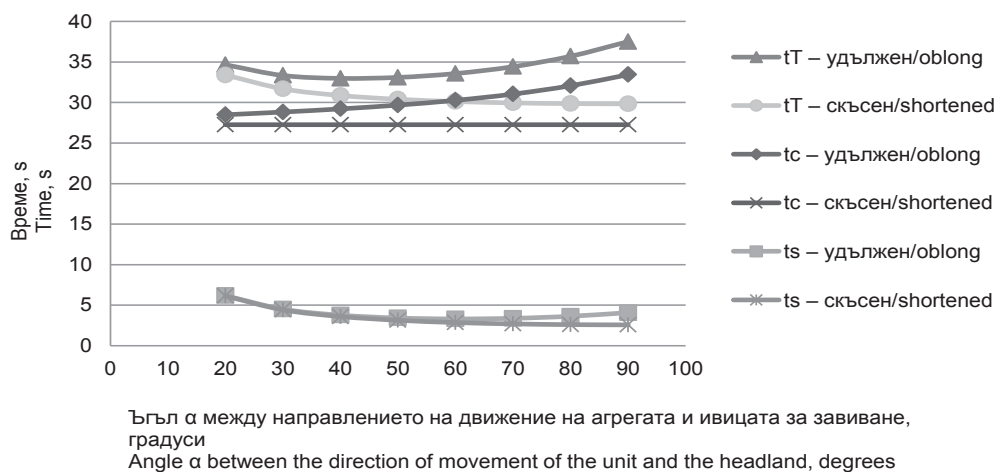
От Фигура 3 се вижда, че времената за изминаване на криволинейния ( $t_c$ ) и праволинейния участъци ( $t_p$ ), както и общото време за завоя ( $t_T$ ), са по-малки при скъсените завои. С увеличаване на ъгъл  $\alpha$  разликата между общите времена за извършване на завоите нараства. Следователно при по-голям ъгъл  $\alpha$  ще е по-ефективно да се използват скъсени завои.

## ИЗВОДИ

Скъсените крушовидни завои имат най-малка дължина и най-малко време за извършване. При тях дължината на криволинейната част на завоя е постоянна, а дължината на праволинейната част намалява с увеличаване на  $\alpha$ .

При малки стойности на  $\alpha$  трябва да се използва скъсен или удължен крушовиден ляв завой, тъй като освен малката си дължина, те осигуряват и по-малка ширина на ивицата за завиване. При по-големи стойности на  $\alpha$  трябва





**Фиг. 3.** Време за извършване на скъсен и удължен крушовиден завой  
**Fig. 3.** Time for performing shortened and oblong pear-shaped turn

ва да се използва скъсен крушовиден ляв завой, а при най-големите стойности на  $\alpha$  могат да се използват скъсени крушовидни леви и десни завой, тъй като имат еднакви дължини и ивици за завиване.

Осморкообразните завой не се препоръчват поради по-голямата си дължина и относително по-големия дял на криволинейния участък, което увеличава времето за извършването им.

## ЛИТЕРАТУРА

- Aurbacher, J., & Dabbert, S.** (2009). Integrating GIS-based field data and farm modeling in a watershed to assess the cost of erosion control measures: An example from southwest Germany. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64(5), 350-362.
- Bochtis, D. D., & Vougioukas, S. G.** (2008). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystems Engineering*, 101(1), 1-12.
- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B., Humbert, T., & Berducat, M.** (2010, September). Maneuvers automation for agricultural vehicle in headland. In *AgEng 2010, International Conference on Agricultural Engineering* (pp. 1-10).
- Ishpekov, S., Petrov, P., Zaykov, R. & Triffonova, N.** (2014). Guiding accuracy of the agricultural navigation with RTK correction on spring sowing. *Poljoprivredna Tehnika (Serbia)*, 39(4), 85-90.
- Jilek, L. & Podpěra, V.** (2005). The effect of the land shape on the energy intensity of operation steps. *RES. AGR. ENG.*, 51(4), 134-139.
- Oksanen, T.** (2007). *Path planning algorithms for agricultural field machines*. Helsinki University of Technology Automation Technology Laboratory, Series A: Research Reports No. 31, Espoo, December 2007
- Oksanen, T., & Visala, A.** (2004). Optimal control of tractor-trailer system in headlands, *Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 7-8 October 2004 Conference (Kyoto, Japan)* Publication Date 7 October 2004 701P1004.
- Oksanen, T., & Visala, A.** (2007). Path planning algorithms for agricultural machines. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Shamshiri, R., Ehsani, R., Maja, J. M., & Roka, F. M.** (2013). Determining machine efficiency parameters for a citrus canopy shaker using yield monitor data. *Applied Engineering in Agriculture*, 29(1), 33-41.
- Spekken, M., & de Bruin, S.** (2013). Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. *Precision Agriculture*, 14(2), 224-244.
- Trendafilov, K.** (2011a). Theoretical determination of the length of turn when ploughing with a traditional plough in a field with irregular shape. *Selskostopanska tehnika*, 48(2), 4-7 (Bg).
- Trendafilov, K.** (2011b). Theoretical determination of the width of strip for turning at shuttle movement of a symmetrical unit in a field with irregular shape. *Selskostopanska tehnika*, 48(5), 15-18 (Bg).
- Tu, X.** (2013). Robust navigation control and headland turning optimization of agricultural vehicles. Iowa University, Graduated Theses and Dissertations, 13188.