

RYSZARD J. GRABOWSKI¹⁾

TURBO-ROUNDBABOUTS AS AN ALTERNATIVE TO STANDARD ROUNDBABOUTS WITH THE CIRCULAR CENTRE ISLAND

RONDA TURBINOWE JAKO ALTERNATYWA DLA ROND KLASYCZNYCH Z WYSPĄ ŚRODKOWĄ W KSZTAŁCIE KOŁA

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia proces kształtowania rond turbinowych. Klasyczne rondo drogowe jest utworzone wokół wyspy środkowej w kształcie koła. Jeżeli podzielimy koło na dwa półkola i przesuniemy je po osi ronda o szerokość pasa ruchu, to otrzymamy wyspę środkową ronda turbinowego. To przesunięcie powoduje, że pojazdy wjeżdżające na pas wewnętrzny, po przekroczeniu osi automatycznie znajdują się na pasie zewnętrznym. W artykule rozważa się również kształtowanie wyspy centralnej za pomocą innych krzywych, tj. elipsy i spirali Archimedesesa. Podano także zasadę tworzenia tarczy ronda za pomocą spirali Archimedesesa oraz opisano zasadę tyczenia takiego ronda w terenie.

ABSTRACT. The paper presents the process of shaping turbo-roundabouts. A classic road roundabout is formed around the central island in the shape of the circle. The central island of the turbo-roundabout will be created when the circle is divided into two semicircles and displaced along the axis of the roundabout by the width of the traffic lane. This shift causes that vehicles entering the interior lane, cross the centre line and are automatically situated in the exterior lane. The paper presents the central island shaping with the use of other curves, including an ellipse and the spiral of Archimedes. Moreover, the principle of creating the circulating lanes of roundabout using the spiral of Archimedes and delineating such roundabout in the terrain are described in the paper.

SŁOWA KLUCZOWE: elipsa, rondo, rondo turbinowe, spirala Archimedesesa.

KEYWORDS: ellipse, roundabout, spiral of Archimedes, turbo-roundabout.

¹⁾ Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska na Politechnice Białostockiej; r.grabowski@pb.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Historia rond sięga końca XX wieku. Początkowo rondami nazywano place powstałe wokół pomnika lub zabytkowej budowli. Ruch kołowy odbywał się dwukierunkowo wokół punktu centralnego. Obowiązywała zasada ustąpienia pierwszeństwa pojazdom wjeżdżającym na rondo przez pojazdy na nim się znajdujące. Wzrost natężenia ruchu spowodował tworzenie się zatorów w ruchu pojazdów, którym nie zawsze można było zapobiec poprzez zwiększenie średnicy ronda. Sytuacja wymagała zmodyfikowania zasad ruchu na tego typu skrzyżowaniach. Dopiero w 1966 roku w Wielkiej Brytanii wprowadzono zasadę pierwszeństwa przejazdu pojazdów znajdujących się na rondzie. Pozwoliło to znacznie zmniejszyć średnicę wyspy centralnej. Pozytywne doświadczenia dotyczące bezpieczeństwa ruchu i przepustowości sprawiły, że ronda stały się popularne nie tylko w Anglii, ale także w innych krajach Europy Zachodniej.

Rondem określa się skrzyżowanie dróg, na których przecięciu występuje wyspa środkowa, wymuszająca ruch okrężny po jednokierunkowej jezdni wokół tej wyspy. Ruch odbywa się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara. Za stosowaniem rond przemawia przede wszystkim większe bezpieczeństwo w stosunku do tradycyjnych skrzyżowań, powodowane mniejszą ilością możliwych punktów kolizji. Ponadto znaczący wpływ na wzrost bezpieczeństwa ruchu ma ograniczenie prędkości przy przejeździe przez rondo, dzięki czemu kierowcy mają więcej czasu na podjęcie właściwej decyzji. W literaturze fachowej podkreśla się, że na rondach występuje zwykle większa przepustowość w porównaniu ze skrzyżowaniem bez wyspy centralnej, co skutkuje znacznie mniejszym zanieczyszczeniem środowiska.

Wyspa środkowa ma najczęściej kształt koła. W ostatnich latach pojawiła się koncepcja kształtowania wyspy środkowej za pomocą dwóch półokręgów przesuniętych o szerokość pasa ruchu, zwanych rondami turbinowymi. Według tej koncepcji, pojazd wjeżdżający na pas zewnętrzny po przekroczeniu osi automatycznie znajduje się na pasie skrajnym. Opis tych rond i idea ich kształtowania przedstawione są głównie w pracach zagranicznych [1 - 4], w polskich natomiast znajdują się nawiązujących do prac źródłowych, np. [5 - 8].

Niniejsze opracowanie jest znaczącym poszerzeniem rozważań zawartych w [8], wzbogaconym o nowe propozycje rozwiązań. Przedstawia się sposób modyfikacji ronda turbinowego kształtującej wyspę centralną za pomocą innych

1. INTRODUCTION

The history of roundabouts goes back to the end of the twentieth century. The term "roundabout" was initially given to the areas which came into existence around monuments and historical buildings. The wheel traffic went in two directions around the central point. In accordance with the governing rules, circulating and existing traffic were required to give priority to the vehicles approaching the roundabout. The intensification of the traffic volume induced vehicle queues which could not always be eliminated by the enlargement of the roundabout diameter. It required some modification of the traffic principles on this type of crossroads. No sooner than in 1966, the rule giving the priority to the circulating traffic was introduced in Great Britain and it let reduce considerably the diameter of the central island. Positive experiences regarding the road safety and the capacity of a roundabout led to the growing popularity of roundabouts, not only in England but also in other West European countries.

The term "roundabout" is used to describe an intersection with a central island which forces the gyratory traffic on a one-way carriageway around the island. The traffic flows in a counterclockwise direction. In favour of using roundabouts, first of all, speaks the road safety which, due to the decreased number of possible collision points, is higher than on traditional crossroads. Moreover, the speed limitation of the circulating traffic has a significant influence on the increased road safety due to the fact that drivers have more time to make a proper decision. Professional literature emphasizes the fact that roundabouts have a higher capacity, compared to the intersections without a central island, and it results in lower environmental pollution.

The central island has most often the shape of a circle. In accordance to the recent conception the central island is formed by adding two semicircles displaced by the width of a traffic lane, called turbo-roundabouts. According to this conception, the vehicle entering the exterior lane, crosses the centre line and is automatically situated on the outer lane. Descriptions of this type of roundabouts and their formation idea have been mainly presented in foreign publications [1 - 4]. Yet there are also some Polish ones, referring to the source publications, e.g. [5 - 8].

This paper constitutes a significant extension of considerations included in [8] and it has been enriched by new solutions proposals. Furthermore, it presents a method of the turbo-roundabout modification according to which the central island is formed with the use of other curves. Special

krzywych. Szczególną uwagę zwraca się na zastosowanie elipsy i spirali Archimedesesa.

W Polsce obserwuje się aktualnie rosnące zainteresowanie tymi rondami. Pojawianie się tego typu obiektów drogowych w praktycznej realizacji wskazuje na celowość analizowania omawianych rozwiązań, tym bardziej że brak jest obecnie wytycznych, którymi należy się kierować przy projektowaniu ronda turbinowego. Dyskusja prowadzona przy tego typu pracach wzbogaca teorię w zakresie projektowania, co pozwala na uzyskanie szerszej perspektywy spojrzenia na ten problem oraz na ewentualne wykorzystanie omawianej koncepcji w praktyce. Warto zaznaczyć, że klasyczne rondo z wyspą środkową w kształcie koła zachowuje jego kształt także po odłożeniu szerokości pasa ruchu w kierunku promieni w poszczególnych punktach wyspy, co nie zawsze zachodzi w przypadku innych krzywych użytych do kształtowania wyspy centralnej. Z powyższych względów używanie skrótu terminologicznego – rondo kołowe – posiada matematyczne uzasadnienie.

2. RONDA KOŁOWE

Ronda w kształcie koła, ze względu na wielkość wyspy środkowej oraz średnicę zewnętrzną, dzieli się według „Wytycznych projektowania skrzyżowań drogowych” na cztery grupy: mini, małe, średnie i duże. Średnice zewnętrzne i wewnętrzne tych rond na terenie zabudowy i poza nim w zależności od ilości projektowanych pasów ruchu przedstawiono w Tablicy 1.

Oczywistym jest, że odnosząc się do kształtowania geometrii rond turbinowych, z uwagi na brak wytycznych projektowania i doświadczeń praktycznych, należy brać pod uwagę i odnosić ich geometrię do rond kołowych, których zastosowanie w realizacjach praktycznych dało już pewne doświadczenia.

3. IDEA RONDA TURBINOWEGO I JEGO KSZTAŁTOWANIE

Idea ronda turbinowego powstała 15 lat temu w Holandii. Pod względem geometrycznym rondo turbinowe stanowią dwa lub więcej współśrodkowych okręgów o przesunięciu po osi ronda równym szerokości pasa ruchu. To przesunięcie powoduje, że pojazd wjeżdżający na pas wewnętrzny, po przekroczeniu osi, automatycznie znajduje się na pasie skrajnym. Dzięki temu w obszarze tarczy ronda

attention is drawn to the usage of an ellipse and the spiral of Archimedes.

A growing interest concerning this type of roundabouts has been recently observed in Poland. Due to the fact that this type of road structures have already appeared in the practical realization, the purpose of analysing these solutions is highly justified, all the more so because of the current absence of necessary guidelines to design a turbo-roundabout. A debate in this type of studies enriches the theory of designing, what enables developing a broad perspective of this problem as well as makes it possible to use the discussed conception in practice. It is worth indicating that a classical roundabout, with a central island in the shape of a circle, maintains its circular shape, also after moving the width of a traffic lane in the direction of the radius in its particular points, what does not always take place in the presence of other curves used for shaping a central island. For this reason, the use of the terminological abbreviation “the circular roundabout” is justified from the mathematical perspective.

2. CIRCULAR ROUNDABOUTS

According to the Crossroads Design Guidelines, the circular roundabouts have been divided into four groups on account of the size of the central island and the external diameter. These are as follows: mini, small, medium and large. The external and internal diameters of these roundabouts, in the built-up area and beyond, depending on the quantity of the designed traffic lanes, are presented in Table 1.

Obviously, in relevance to the forming of turbo-roundabouts geometry and due to the absence of design standards and practical experiences, their geometry should be taken into consideration and related to the circular roundabouts, which have already been used in practical realisation and have brought certain experience.

3. IDEA OF A TURBO-ROUNDABOUT AND ITS FORMING

The idea of a turbo-roundabout was created 15 years ago in the Netherlands. Considering a geometric design, turbo-roundabouts have been constituted of two or more homocentric circles with a displacement on the axis of a roundabout equalled a width of the traffic lane. This displacement induces the vehicle, which enters the interior lane, to get situated automatically on the outer lane, after crossing the axis. Therefore, the weaving manoeuvre has

wyeliminowano manewr przeplatania przy zachowaniu dwóch pasów ruchu. Tarcza ronda turbinowego może być ukształtowana zarówno z półokręgów, jak i z ćwiartek okręgów.

been eliminated in the area of the circulating lanes while both traffic lanes have remained unchanged. The circulating lanes of a turbo-roundabout can be formed by both semicircles and the quarter-circles.

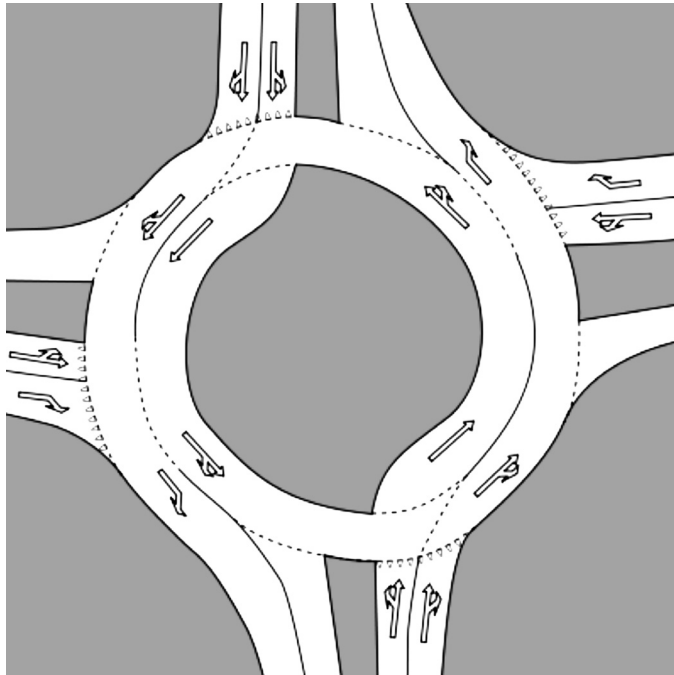
Tablica 1. Wymogi projektowe dotyczące ronda kołowego
Table 1. Design requirements related to the circular roundabout

Typ / Type		Teren zabudowy / The built-up area			Poza terenem zabudowy / Non-built-up area		
Ronda Roundabouts	Ilość pasów Number of lanes	Średnica / Diameter [m]		Zastosowanie ronda The application of a roundabout	Średnica / Diameter [m]		Zastosowanie ronda The application of a roundabout
		wyspy środkowej of the central island	zewnętrzna exterior		wyspy środkowej of the central island	zewnętrzna exterior	
Mini	–	4 - 10	14 - 22	Osiedla ul. Z, L, D Housing estate St. Z, L, D	–	–	–
Małe / Small	1	10 - 28	26 - 40	Drogi klasy G, L, Z przy małym ruchu pieszych Roads of classes G, L, Z with a low levels of pedestrians movement	15 - 28	30 - 40	Drogi klasy G, L, Z. Główne wloty do miast Roads of classes G, L, Z Main entrances to towns
	2	17 - 25	37,5 - 45		20 - 25	40 - 45	
Średnie / Medium	1	29 - 33	41 - 45	Drogi klasy G i wielopasowe klasy Z Roads of class G and the multi-lane roads of class Z	29 - 38	41 - 50	Drogi klasy G, L, Z Główne wloty do miast Roads of classes G, L, Z Main entrances to towns
	2	25 - 37	45 - 55		25 - 47	45 - 65	
Duże / Large	–	> 37	> 55	Na granicy terenu zabudowy On the boundary of a built-up area	> 50	> 65	Wyjątkowo na początku lub końcu drogi klasy S oraz GP Exceptionally at the onset or the end of the roads of classes S and GP
Uwagi / Remarks							
Objaśnienie symboli klas dróg na podstawie Dziennika Ustaw z roku 1999, nr 43, pozycja 430 Legend of symbols indicating the road classes on the basis of the Journal of Laws of 1999, No. 43, item 430							
Z – drogi zbiorcze / frontage roads, L – drogi lokalne / local roads, D – drogi dojazdowe / access roads, G - drogi główne / trunk roads							
S – drogi ekspresowe / expressways, GP – drogi główne ruchu przyspieszonego / fast traffic trunk roads							

Rys. 1 przedstawia rondo turbinowe ukształtowane z dwóch okręgów o środkach przesuniętych wzdłuż ustalonej prostej o ten sam odcinek (szerokość pasa ruchu) względem środka tarczy. Łatwo zauważyć, że taki sposób

Fig. 1 presents a turbo-roundabout formed by two circles with the centres displaced along the settled straight line within the same section (the width of the traffic lane) in relation to the centre of the circulating lanes. It is noticeable

kształtowania posiada szczególne uzasadnienie, gdy jeden kierunek ruchu (na Rys.1 jest to kierunek o dwóch pasach ruchu) jest dominujący pod względem natężenia. Jeżeli trudno jest wyróżnić jeden kierunek o dominującym natężeniu ruchu, wtedy rondo turbinowe można kształtować z czterech ćwiartek okręgu przesuniętych po osiach w taki sposób, aby ich środki tworzyły kwadrat.



that this formation method is particularly justified when one traffic direction (in Fig. 1, it is a direction with two traffic lanes) is dominant in terms of the intensity. When it is hard to distinguish a single direction with dominant traffic intensity, a turbo-roundabout can be formed with the use of four quarter-circles displaced on the axes, using a method which allows their centres to form a square.

Rys. 1. Widok tarczy typowego ronda turbinowego [9]
Fig. 1. View of the circulating lanes of the typical turbo-roundabout [9]

The form of a turbo-roundabout can significantly differ from the above variants. In a case of a turbo-roundabout with three entrances, a form of the central island might have an asymmetric shape (Fig. 2). Obviously, the final shape of a roundabout depends on both the reigning traffic conditions and on the designer's inventiveness.



Rys. 2. Widok tarczy trzywylotowego ronda turbinowego [3]
Fig. 2. View of the circulating lanes of the three-exit turbo-roundabout [3]

Ukształtowanie ronda turbinowego może znacząco odbiegać od wyżej podanych wariantów. W przypadku trójwłotowego ronda turbinowego kształt wyspy centralnej może mieć kształt asymetryczny (Rys. 2). Oczywiście finalny kształt ronda zależy od panujących warunków ruchu i od pomysłowości projektanta.

W literaturze fachowej podaje się następujące cechy charakterystyczne oraz wymogi dotyczące rond turbinowych [np. 6, 8]:

- spiralne oznakowanie poziome połączone ze spiralnym ukształtowaniem tarczy ronda,
- możliwość wyboru kierunku jazdy tylko na wlocie, bez możliwości zmiany pasa ruchu w obrębie tarczy ronda,
- dwupasowe wloty – co najmniej dwa i przynajmniej jeden dwupasowy wylot,
- nie więcej niż dwa pasy ruchu na tarczy ronda w strefie wlotów (zwiększenie bezpieczeństwa),

Professional literature shows the following requirements and the characteristic features related to the turbo-roundabouts [e.g. 6, 8]:

- spiral road marking interconnected to the spiral form of the circulating lanes,
- possibility of choosing the driving direction at the entrance, without prospects of changing the traffic lane in the area of the circulating lanes,
- two-lane entrances (at least two) and at least one two-lane exit,
- not more than two traffic lanes on the circulating lanes in the entries area (improving road safety),

- brak możliwości zawracania na jednym z kierunków ruchu (w przypadku braku odpowiedniego poszerzenia pierścienia ronda),
- separator oddzielający pasy ruchu na tarczy ronda oraz na wlotach.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że rondo turbinowe jest rozwiązaniem stosunkowo młodym, dlatego brak jest szczegółowych przepisów normatywnych definiujących podstawowe elementy organizacji ruchu oraz zasad oznakowania, mających szczególne znaczenie w tego typu rozwiązaniach. Dobrze zaprojektowane oznakowanie poziome na pasach wlotów oraz na samej tarczy ronda pozwala kierowcy rozpoznać schemat poruszania się po takim rondzie, ułatwiając tym samym przejazd przez nie w wybranym kierunku. Niezbędne oznakowanie powinno pochodzić z grupy znaków P-8, czyli strzałek obrazujących, w którą stronę można jechać z danego pasa nie tylko na wlocie, ale i w obrębie ronda. Jeżeli dany kierunek ruchu wymaga objechania ronda, to należy zaznaczyć to wyraźnie na danym pasie jezdni. Zmianę pasa na tarczy ronda uniemożliwia separator, który oddziela sąsiadujące pasy ruchu w obrębie ronda i na jego wlotach. W przepisach holenderskich separator powinien być elementem betonowym o szerokości 30 cm i wysokości 7 cm, obmalowanym obustronnie linią ciągłą o grubości 10 cm, w odległości 15 cm od krawędzi do środka linii ciągłej i dodatkowo linią utworzoną z punktowych elementów odbłaskowych, położonych 20 cm od środka ciągłej linii. Separatory posiadają kształt nieciągły, aby umożliwić odpływ wody (Rys. 3).

- absence of possibility of U-turn maneuvers on one of the traffic directions (in case of the absence of suitable extension of the roundabout ring),
- traffic separator disjoining traffic lanes on the circulating lanes and on the entrances.

It has to be significantly emphasized that a turbo-roundabout constitutes a comparatively recent solution; therefore there is a lack of detailed normative acts defining the basic units of both the traffic organization and the marking principles which are very significant in this type of solutions. A well designed road marking on both the entrance lanes and the circulating lanes allows a driver to identify the traffic scheme on this type of a roundabout and helps to drive in the chosen direction. Indispensable road marking should include the signs from the P-8 group, that is to say, the arrows illustrating the possible way of driving from the particular lane, on both the entrance and within the roundabout. If drivers are required to go round the roundabout in the particular traffic direction, the appropriate traffic lane should be clearly marked. Changing the traffic lane on the circulating lanes of the roundabout is prevented by the traffic separator which disjoins the neighbouring traffic lanes within a roundabout and on its exits. According to the Dutch road traffic laws, traffic separator is a 30 cm in width and 7 cm in height concrete element with a 10 cm thick, bilaterally painted, continuous line within the 15 cm distance from the edge towards the centre. Additionally, there is a line made of reflecting road studs placed 20 cm from the centre of the continuous line. To enable an outflow of water, the traffic separator has a discontinuous shape (Fig. 3).



Rys. 3. Widok separatora na tarczy ronda [3]

Fig. 3. View of the traffic separator on the circulating lanes of a roundabout [3]

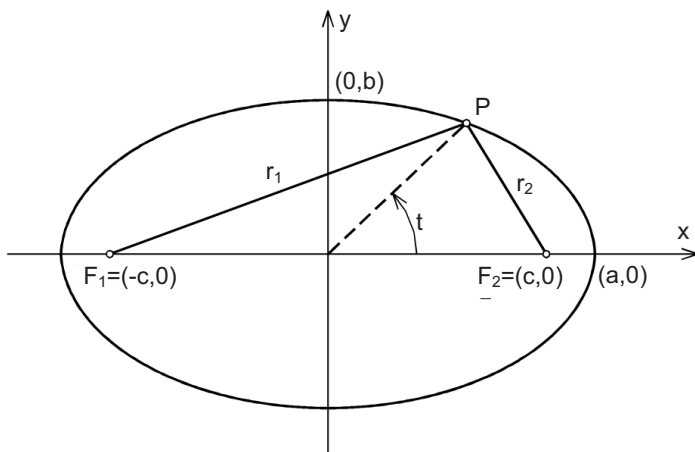
4. KSZTAŁTOWANIE RONDA TURBINOWEGO ZA POMOCĄ ELIPSY

Elipsę definiujemy jako zbiór punktów płaszczyzny, dla których suma odległości od dwóch danych punktów $F_1 = (-c, 0)$ i $F_2 = (c, 0)$, zwanych ogniskami, jest stała i większa od ich odległości. Równanie elipsy, której ogniska leżą na osi Ox symetrycznie względem początku układu współrzędnych (Rys. 4), ma postać:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

gdzie: a – półoś wielka, b – półoś mała.

Z własności elipsy wynika, że $\overline{F_1P} + \overline{F_2P} = r_1 + r_2 = 2a$.



Ukształtowanie tarczy elipsoidalnego ronda turbinowego można przeprowadzić analogicznie do tarczy ronda turbinowego z wykorzystaniem okręgu. Bazą geometrii utworzenia zewnętrznej krawędzi wyspy środkowej będą półelipsy o środkach przesuniętych wzdłuż osi o wartość równą szerokości pasa tarczy ronda s . Długości odpowiednich półosi (a oraz b) obu elips nie muszą być równe (na Rys. 5 przyjęto jednakowe wymiary obu półelips).

Rys. 5. Kształtowanie tarczy ronda z wykorzystaniem półelips

Fig. 5. Formation of the circulating lanes of a roundabout with the use of the semi-ellipse

4. FORMATION OF A TURBO-ROUNDABOUT BY USING AN ELLIPSE

An ellipse is defined as the set of points in a plane for whose a sum of the distances from two fixed points, called the focal points, $F_1 = (-c, 0)$ and $F_2 = (c, 0)$ remains constant and is larger than the distance of these points. The equation of an ellipse whose focal points are situated on the axis Ox , symmetrically to the origin of the coordinate system (Fig. 4), is as follows:

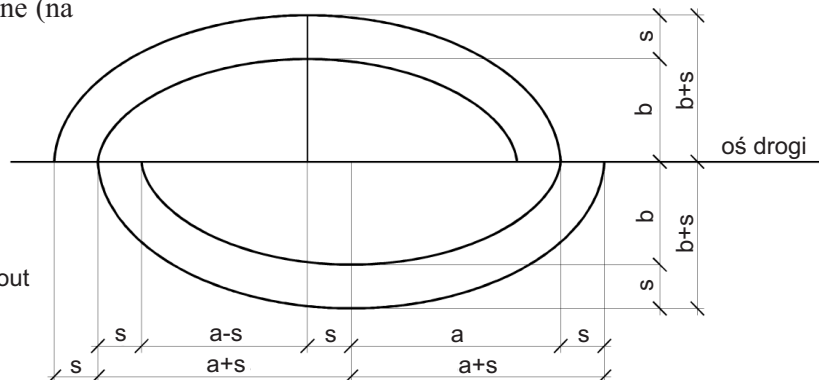
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

where: a – semi-major axis, b – semi-minor axis.

Features of an ellipse confirm that: $\overline{F_1P} + \overline{F_2P} = r_1 + r_2 = 2a$.

Rys. 4. Oznaczenie parametrów elipsy
Fig. 4. Designation of ellipse parameters

The formation of the circulating lanes of the ellipsoid turbo-roundabout can be conducted similarly to the circulating lanes of a turbo-roundabout formed with the use of a circle. The semi-ellipses with centres displaced along the axis, by the value equalled the width of the circulating lanes of roundabout s , constitute the geometric base of creating the central island external edge. The lengths of the corresponding semi-axes (a and b) of both ellipses do not have to be equal (in Fig. 5 it has been assumed that both semi-ellipses have equal dimensions).



W celu ukształtowania spiralnych pasów tarczy należy zakreślić następane półelipsy o osiach $(a + s)$ i $(b + s)$, czyli powiększonych o wartość szerokości pasa. W ten sposób zostanie utworzony wewnętrzny pas ruchu, który po przekroczeniu osi stanie się pasem zewnętrznym. Każdorazowo środek wszystkich półelips zakreślonych po jednej stronie osi jest wspólny i przesunięty w stosunku do środka półelips zakreślonych po przeciwnej stronie osi o wartość równą szerokości pasa s (Rys. 5). Wartość półosi stosowanej elipsy nie może być dowolna, a ściślej stosunek półosi dużej do długości półosi małej nie może przekroczyć pewnej wymagającej ustalenia wartości. Gdy $a = b$, dolna wartość ilorazu $a/b = 1$, wtedy elipsa jest okręgiem. Wielkość stosunku półosi elipsy, która jest bazą konstruowania ronda turbinowego, ustala się na podstawie zakresu wielkości wyspy środkowej obowiązującego dla rond klasycznych. Założono, że elipsa tworząca wewnętrzny pas ruchu ronda turbinowego w żadnym miejscu nie może być kształtowana przez promień mniejszy niż minimalny dopuszczalny w przypadku ronda kołowego oraz że żadna z półosi nie może być dłuższa niż promień maksymalny dla tej samej grupy rond.

Promień krzywizny elipsy w dowolnym jej punkcie $M(x_0, y_0)$ wyraża się wzorem:

$$r = a^2 b^2 \sqrt{\left(\frac{x_0^2}{a^4} + \frac{y_0^2}{b^4}\right)^3}. \quad (2)$$

Maksymalne wartości krzywizny elipsa przyjmuje w punktach $A_1 = (-a, 0)$ oraz $A_2 = (a, 0)$. Podstawiając współrzędne punktu A_2 do wzoru (2), otrzymamy wzór na minimalną wartość promienia krzywizny elipsy o danych półosiach a oraz b :

$$r = \frac{b^2}{a}. \quad (3)$$

Przyjęcie długości jednej z półosi i minimalnej wartości promienia krzywizny pozwala wyznaczyć powyższym wzorem dopuszczalną wartość drugiej półosi elipsy.

Kryterium kształtowania wyspy centralnej za pomocą elipsy oparto na aktualnych wymogach dotyczących kształtowania rond kołowych. Zakres zmian półosi elipsy określono w taki sposób, aby jej wykres zmieścił się w pierścieniu kołowym wyznaczonym przez minimalny i maksymalny promień okręgu dopuszczony przez wytyczne [10] dla wyspy środkowej danego typu ronda.

Zgodnie z [10], klasyczne 2-pasowe małe rondo kołowe w obszarze zabudowanym powinno posiadać średnicę wyspy od 17 m do 25 m (Tabl. 1). Przyjmując maksymalną

In order to form the spiral lanes of the circulating lanes, the succeeding semi-ellipses with axes $(a + s)$ and $(b + s)$ have to be outlined, that is to say, the ones which have been enlarged by the value of the lane width. This is a way of creating the interior traffic lane which, subsequent to the crossing an axis, becomes the exterior lane. Each time the centre of all semi-ellipses outlined on one side of the axis is common and displaced in proportion to the centre of the semi-ellipse, which is outlined on the opposite side of the axis, by the value equalled the width of lane s (Fig. 5). Value of a semi-axis of the appropriate ellipse cannot be arbitrary, more precisely; a ratio of the semi-major axis to the length of the semi-minor axis cannot exceed the certain value which requires determination. When $a = b$, the lower value of the quotient $a/b = 1$, then the ellipse is a circle. The size of the relation of the ellipse semi-axis, which is the base for constructing a turbo-roundabout, has been determined on the basis of the size range of central island (applicable for standard roundabouts). It has been assumed that the ellipse forming the interior traffic lane of a turbo-roundabout cannot, at any point, be shaped by a radius smaller than the minimal admissible radius destined for a circular roundabout, furthermore, none of the semi-axis can be longer than the maximal radius for the same group of roundabouts.

The curvature of an ellipse at any of its point $M(x_0, y_0)$ is expressed in the following formula:

$$r = a^2 b^2 \sqrt{\left(\frac{x_0^2}{a^4} + \frac{y_0^2}{b^4}\right)^3}. \quad (2)$$

An ellipse accepts the maximal values of a curvature in points $A_1 = (-a, 0)$ and $A_2 = (a, 0)$. By substituting the coordinates of point A_2 to formula (2), we will obtain a formula for the minimum value of the ellipse curvature radius with given semi-axes a and b :

$$r = \frac{b^2}{a}. \quad (3)$$

Acceptance of both the length of one of the semi-axis and the minimum value of the curvature radius allows, by using the above mentioned formula, to determine the admissible value of the second semi-axis of the ellipse.

According to guidelines [10], standard two-lane small circular roundabout in the built-up area should have the island diameter of 17 to 25 m in length (Table 1). Assuming that the maximum value of the semi-major axis $a = 12.5$ m and the minimum curvature radius $r = 8.5$ m, from formula (3) we will obtain the minimum value of the length of the

wartość dużej półosi $a = 12,5$ m oraz minimalny promień krzywizny $r = 8,5$ m, ze wzoru (3) otrzymamy minimalną wartość długości osi $b = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{12,5 \cdot 8,5} = 10,3$ m. Wartość $b = 10,3$ m jest minimalną możliwą długością półosi b przy ustalonej maksymalnej długości półosi $a = 12,5$ m, dla której w żadnym miejscu tor jazdy kształtowany przez tę elipsę nie będzie miał krzywizny większej niż zalecana [10]. Górna granica ilorazu półosi wyniesie więc $\frac{a}{b} = \frac{12,5}{10,3} = 1,21$. Zatem podstawowy warunek projektowy przy kształtowaniu 2-pasowego małego ronda turbinowego za pomocą elipsy wynosi $1 \leq \frac{a}{b} \leq 1,21$. Dla $a/b = 1$ krzywa jest okręgiem, zaś dla $a/b = 1,21$ elipsa posiada maksymalne dopuszczalne spłaszczenie. Dla innych wartości półosi a z przedziału $\langle 8,5\text{m}; 12,5\text{m} \rangle$, minimalne wartości półosi b zostały wyznaczone ze wzoru (3) i zestawione w Tabelicy 2. Jeżeli w projekcie przyjęto, np. półoś dużą $a = 12$ m to minimalna półoś $b = 10,1$ m, zatem jej długość powinna należeć do przedziału $\langle 10,1$ m; 12 m \rangle .

axis $b = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{12,5 \cdot 8,5} = 10,3$ m. The value $b = 10,3$ m is the minimum acceptable length of the semi-axis b with the fixed maximum length of the semi-axis $a = 12,5$ m for which, at no point, the driving circuit, shaped by this ellipse, will have the curvature larger than it is recommended by guidelines [10]. Thus, the upper limit of the quotient of the semi-axis will equal $\frac{a}{b} = \frac{12,5}{10,3} = 1,21$. Therefore the basic design condition for the formation of a two-lane turbo-roundabout by using the ellipse equals $1 \leq \frac{a}{b} \leq 1,21$.

For $a/b = 1$ the curve is a circle, meanwhile for $a/b = 1,21$ the ellipse has the maximum admissible flattening. For the other values of the semi-axis a from the interval $\langle 8,5$ m, $12,5$ m \rangle , the minimum values of semi-axis b were determined from formula (3) and stated in Table 2. If a project assumes that, e.g. the semi-major axis $a = 12$ m, then the minimum semi-axis $b = 10,1$ m, therefore its length should belong to the interval $\langle 10,1$ m, 12 m \rangle .

Tablica 2. Parametry elipsoidalnych rond turbinowych na terenie zabudowy
Table 2. Parameters of the ellipsoid turbo-roundabouts in the built-up area

Wielkość ronda The size of a roundabout	Parametry elipsy Parameters of the ellipse	Zakres zmienności parametrów Range of parameters variability							
Małe Small	a [m]	8,5	9	10	11	12	12,5	–	–
	b [m]	8,5	8,7	9,2	9,7	10,1	10,3	–	–
	$a - b$ [m]	0	0,3	0,8	1,3	1,9	2,2	–	–
	a/b	1,00	1,03	1,09	1,13	1,19	1,21	–	–
Średnie Medium	a [m]	12,5	13	14	15	16	17	18	18,5
	b [m]	12,5	12,7	13,2	13,7	14,1	14,6	15,0	15,2
	$a - b$ [m]	0	0,3	0,8	1,3	1,9	2,4	3,0	3,3
	a/b	1,00	1,02	1,06	1,09	1,13	1,16	1,20	1,22

Granice wielkości kołowej wyspy środkowej klasycznego 2-pasowego ronda średniego w obszarze zabudowanym mieszczą się w przedziale od 25 m do 37 m. Przyjmując maksymalną długość półosi $a = 18,5$ m oraz minimalny promień krzywizny $r = 12,5$ m, ze wzoru (3) otrzymamy wielkość półosi $b = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{12,5 \cdot 8,5} = 10,3$ m. Wartość długości półosi $b = 15,2$ m jest wartością minimalną, jeżeli

The size limits of the circular central island of a standard two-lane medium roundabout, situated in the built-up area, belong to the interval from 25 to 37 m. By accepting the maximum length of the semi-axis $a = 18,5$ m and the minimum curvature radius $r = 12,5$ m from formula (3), we will receive the size of the semi-axis $b = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{12,5 \cdot 8,5} = 10,3$ m. The value of the length of the

$a = 18,5$ m. Górna granica stosunku a/b wynosi $\frac{a}{b} = \frac{18,5}{15,2} = 1,22$, zatem zakres zmienności stosunku półosi a oraz b dla średnich rond turbinowych w obszarze zabudowanym wynosi $1 \leq \frac{a}{b} \leq 1,22$. Dla $a/b = 1$ krzywa jest okręgiem, zaś dla $a/b = 1,22$ elipsa posiada maksymalne dopuszczalne spłaszczenie. Dla innych wartości $a \in \langle 12,5; 18,5 \rangle$ z krokiem co metr, w Tabl. 2 zestawiono minimalne wartości półosi b . Jeżeli projektant przyjął, np. $a = 17$ m, to minimalna długość półosi $b = 14,6$ m, zatem jej długość powinna należeć do przedziału $\langle 14,6 \text{ m}; 17,0 \text{ m} \rangle$.

Przeprowadzając analogiczne rozważania dla 2-pasowego małego i średniego ronda turbinowego na obszarze niezabudowanym, otrzymamy minimalne wartości półosi b dla przyjętych wartości półosi a . Ich wartości zestawiono w Tablicy 3.

semi-axis $b = 15.2$ m is a minimum value if $a = 18.5$ m. The upper limit of the relation a/b is $\frac{a}{b} = \frac{18.5}{15.2} = 1.22$, therefore the range of variability of the relation of the semi-axes a and b , for medium turbo-roundabouts in the built-up area, equals $1 \leq \frac{a}{b} \leq 1.22$. For $a/b = 1$ the curve is a circle, meanwhile for $a/b = 1.22$ the ellipse has the maximum admissible flattening. For the other values $a \in \langle 12.5, 18.5 \rangle$ with a step every 1 metre, the minimum values of the semi-axis b are presented in Table 2. If the designer has accepted that, e.g. $a = 17$ m, then the minimum length of the semi-axis $b = 14.6$ m, therefore its length should belong to the interval $\langle 14.6 \text{ m}, 17.0 \text{ m} \rangle$.

In the process of an analogous inference regarding two-lane small and medium turbo-roundabout in the non-built-up area, we will obtain the minimum values of semi-axis b for the fixed values of the semi-axis a . Their values are presented in Table 3.

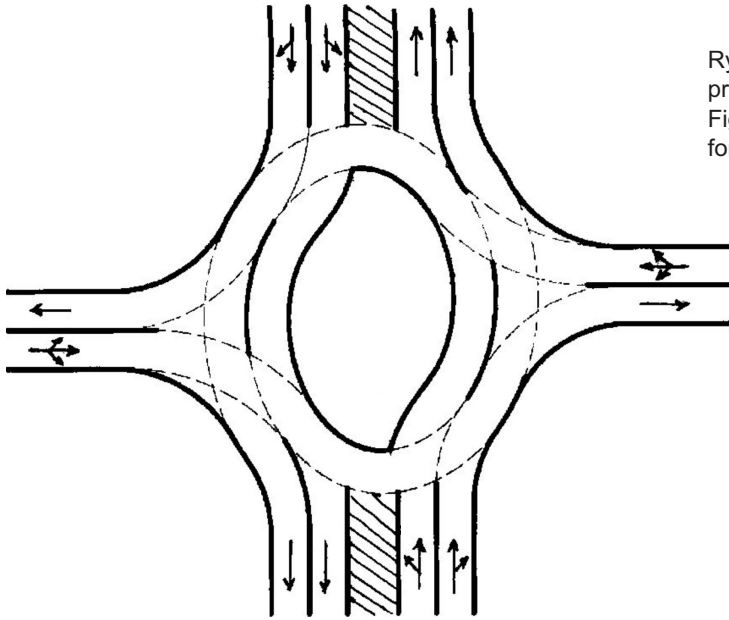
Tablica 3. Parametry elipsoidalnych rond turbinowych poza terenem zabudowy
Table 3. Parameters of the ellipsoid turbo-roundabouts in the non-built-up area

Wielkość ronda The size of a roundabout	Parametry elipsy Parameters of the ellipse	Zakres zmienności parametrów Range of parameters variability								
Małe Small	a [m]	10	11	12	12.5	–	–	–	–	–
	b [m]	10	10.5	11.0	11.2	–	–	–	–	–
	a/b	1.00	1.05	1.09	1.12	–	–	–	–	–
Średnie Medium	a [m]	12.5	13	14	16	18	20	22	23	23.5
	b [m]	12.5	12.7	13.2	14.1	15.0	15.8	16.6	17.0	17.1
	a/b	1.00	1.02	1.06	1.13	1.20	1.27	1.33	1.35	1.37

Tarcza ronda turbinowego kształtowana z wykorzystaniem elipsy daje projektantowi większe możliwości wpływu na jego geometrię. Warto zaobserwować, że okrąg wykorzystywany do projektowania rond kołowych jest szczególnym przypadkiem elipsy, więc ujęcie to zawiera w sobie klasyczne podejście do projektowania ronda. Wzrost wartości ilorazu a/b powoduje wzrost spłaszczenia elipsy. Wykorzystując ten fakt w zależności od struktury kierunkowej i rodzajowej panującej na danym skrzyżowaniu projektant może bardziej dostosować się do potrzeb ruchowych panujących na takim skrzyżowaniu. Wszystkie wymiary półosi oraz ich stosunki powinny spełniać wymogi przedstawione w Tablicach 2 i 3. Jeżeli

The circulating lanes, formed by the use of an ellipse give the designer greater possibilities of influencing its geometry. It is worth observing that the circle used for designing circular roundabouts is a specific case of the ellipse, therefore this conception contains the classic approach to designing a roundabout. The growth of the value of the quotient a/b results in the growth of the ellipse flattening. Using this concept, depending on both the direction and the generic structure common on the given crossroads, the designer is able to adjust himself to the traffic requirements on such crossroads. All the semi-axis dimensions and their ratios should fulfill the requirements presented in Tables 2 and 3. If the given crossroads has one dominant

na danym skrzyżowaniu występuje jeden dominujący pod względem natężenia kierunek ruchu, to zastosowanie elipsy w kształtowaniu ronda turbinowego (Rys. 6) jest szczególnie wskazane. Im większa różnica w sile natężenia dwóch kierunków ruchu, tym powinna być zastosowana elipsa o większym spłaszczeniu. Na obecnym etapie badań trudno jest podać ściśle związki pomiędzy tymi wielkościami, tj. różnicą natężenia i wartością spłaszczenia. Wymaga to głównie obserwacji i badań empirycznych.



Rys. 6. Przykład ronda turbinowego z wykorzystaniem elipsy przy dominującym jednym kierunku ruchu z pasem dzielącym [5]
Fig. 6. Example of a turbo-roundabout with the use of ellipses for dominant one direction traffic with the median lane [5]

Warto zaznaczyć, że jeżeli wyspa środkowa wyznaczona jest w kształcie elipsy, to po odłożeniu szerokości pasa ruchu s wzdłuż promieni krzywizny, w poszczególnych jej punktach otrzymamy tzw. krzywą offsetową, która nie spełnia równania elipsy. Należy przypuszczać, że odchylenia tak otrzymanej krzywej od najlepiej dopasowanej elipsy, w sensie metody najmniejszych kwadratów, będą bardzo małe, wręcz nieistotne pod względem dokładności dopasowania toru pojazdu przez kierowcę do krzywizny teoretycznej. Ten problem wymaga odrębnego badania.

Do wytyczenia elipsy, oprócz podanej postaci uwikłanej (1), wygodniejszą do wykorzystania jest postać parametryczna:

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \cos t, \\ y &= b \cdot \sin t, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie $t \in <0, 2\pi>$ określa kąt jaki tworzy promień wodzący z dużą półosią (Rys. 4).

(in terms of the intensity) traffic direction, the use of an ellipse in forming a turbo-roundabout (Fig. 6) is particularly advisable. The larger difference in the strength of the intensity of two traffic directions, the larger flattening should have the ellipse that is used for the formation. At the current stage of researches, it is difficult to indicate a close connection between the intensity difference and the flattening value. It requires a lot of observation and empirical investigations.

It should be noted that if the central island is defined as the ellipse shaped one, then subsequent to the displacing (along the radii of the curvature) the width of traffic lane s , in its individual points, we will obtain so called offset curve which does not fulfill the equation of the ellipse. Presumably the deflections of a curve, which was obtained in that manner, from the best adjusted ellipse, in the sense of the least square method, will be very slight or even insignificant in terms of the accuracy regarding a driver's adjustment of the track of a vehicle to the theoretical curvature. This issue requires separate studies.

To layout an ellipse, except the above mentioned non parametric Eq. (1), it is more convenient to use the parametric equation:

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \cos t, \\ y &= b \cdot \sin t, \end{aligned} \quad (4)$$

where $t \in <0, 2\pi>$ defines the angle formed by the radius vector with the semi-major axis (Fig. 4).

5. SPIRAL OF ARCHIMEDES

Determining the shape of the roundabout using the four quadrants of the square can be reflected in a natural way using the spiral of Archimedes. That is a curve outlined by point M moving with the constant speed v along the half-line, which have the origin in point O (the origin of

5. SPIRALA ARCHIMEDESA

Kształtowanie runda z czterech ćwiartek kwadratów może być odzwierciedlone w naturalny sposób za pomocą spirali Archimedeasa. Jest to krzywa zakreślona przez punkt M , poruszający się ze stałą prędkością v po półprostej mającej początek w punkcie O (początek układu współrzędnych) i obracającej się wokół niego ze stałą prędkością kątową ω (Rys. 7). Równanie spirali we współrzędnych biegunowych ma postać:

$$\rho = a \cdot \varphi, \quad \text{gdzie} \quad a = \frac{v}{\omega} > 0. \quad (5)$$

Cechą charakterystyczną spirali Archimedeasa jest zachowanie stałego odstepu wynoszącego $2\pi \cdot a$ pomiędzy sąsiednimi punktami tej krzywej, liczonego wzdłuż promienia wodzącego. Własność ta pozwala na wyznaczenie wartości a . Jeżeli założymy w projekcie, że odstęp pomiędzy spiralami wynosi D , to $a = \frac{2\pi}{D}$. Wykorzystując powy-

ższy wzór, otrzymamy promienie wodzące dla odstępów kątowych, np. co $\frac{\pi}{4}$ (podział kąta pełnego na 8 części):

$$\rho_{\frac{\pi}{2}} = a \frac{\pi}{2} = \frac{D}{4} = 0,25 D, \quad \rho_{\frac{3\pi}{4}} = a \frac{3\pi}{4} = \frac{3}{8} D = 0,375 D,$$

$$\rho_{\pi} = a \pi = \frac{D}{2} = 0,5 D, \quad \rho_{\frac{5\pi}{4}} = a \frac{5\pi}{4} = \frac{5}{8} D = 0,625 D,$$

$$\rho_{\frac{3\pi}{2}} = a \frac{3\pi}{2} = \frac{3}{4} D = 0,75 D, \quad \rho_{\frac{7\pi}{4}} = a \frac{7\pi}{4} = \frac{7}{8} D = 0,875 D,$$

$$\rho_{2\pi} = a 2\pi = D, \quad \rho_{\frac{9\pi}{4}} = a \frac{9\pi}{4} = \frac{9}{8} D = 1,125 D.$$

Następną gałąź spirali wyznaczamy, odkładając odstęp D wzdłuż promienia wodzącego, od wyznaczonych już punktów. Zwróćmy uwagę na prostotę wyznaczenia terowego spirali. Odkładanie promienia wodzącego odbywa się od stałego punktu O , co jest szczególnie wygodne przy użyciu przymiaru wstęgowego. Wyznaczenie kątów w terenie możemy łatwo zrealizować poprzez ich podział na pół, wyznaczając kierunki dwusiecznych. Oczywiście jest, że w praktycznej realizacji należy zmniejszyć odstepy kątowe, w stosunku do podanych wyżej (np. przez podział kąta pełnego na 16 części, tj. dla odstepu kątowego $\frac{\pi}{8}$).

Jeżeli w zakresie zmiany kąta $\varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$ promienie wodzące są za małe, to można rozpocząć wyznaczanie użytkowej gałęzi spirali dla $\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$ (która będzie drugą gałęzią spirali – na Rys. 7 punkt M jest określony dla

the coordinate system), and turning around it at a constant angular velocity ω (Fig. 7). The equation of the spiral in the polar coordinates has the following form:

$$\rho = a \cdot \varphi, \quad \text{where} \quad a = \frac{v}{\omega} > 0. \quad (5)$$

A characteristic feature of the spiral of Archimedes is the maintenance of the constant separation distance (equal to $2\pi \cdot a$) between the neighboring points of this curve, measured along the radius vector. This feature allows determining the value of a . If we assume in the project that the distance between the spirals is equal to D , then $a = \frac{2\pi}{D}$.

Using the above formula, we obtain the radius vectors for the angular intervals, e.g. every $\frac{\pi}{4}$ (division of the full angle into 8 parts):

$$\rho_{\frac{\pi}{2}} = a \frac{\pi}{2} = \frac{D}{4} = 0.25 D, \quad \rho_{\frac{3\pi}{4}} = a \frac{3\pi}{4} = \frac{3}{8} D = 0.375 D,$$

$$\rho_{\pi} = a \pi = \frac{D}{2} = 0.5 D, \quad \rho_{\frac{5\pi}{4}} = a \frac{5\pi}{4} = \frac{5}{8} D = 0.625 D,$$

$$\rho_{\frac{3\pi}{2}} = a \frac{3\pi}{2} = \frac{3}{4} D = 0.75 D, \quad \rho_{\frac{7\pi}{4}} = a \frac{7\pi}{4} = \frac{7}{8} D = 0.875 D,$$

$$\rho_{2\pi} = a 2\pi = D, \quad \rho_{\frac{9\pi}{4}} = a \frac{9\pi}{4} = \frac{9}{8} D = 1.125 D.$$

The succeeding branch of the spiral is determined by removing distance D , from already designated points, along the radius vector. The simplicity of the area determination of the spiral is worth noting. The removing of the radius vector starts at the constant point O , what is particularly convenient when using the measuring tape. Determination of the angles in the area can be easily accomplished through the equal division, by assigning the directions of the bisectors.

Indeed, in practical implementation, the angular distances should be reduced in relation to the ones mentioned above (for example, by dividing the full angle into 16 parts, i.e. the angular distance $\frac{\pi}{8}$). If within the range of the change of the

angle $\varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$ the radius vectors are too small, the active branch of the spiral can be assigned for $\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$ (which, in fact, constitutes the second branch of the spiral – in Fig. 7 point M is determined for the angle $\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$, more precisely $\varphi \in \left(2\pi, \frac{5}{2}\pi\right)$ or with any value of angle φ . For example, for $\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$ with the angular spacing $\frac{\pi}{4}$, the value of the radius vectors will be as follows:

$\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$ ściślej $\varphi \in \left(2\pi, \frac{5}{2}\pi\right)$ lub rozpocząć jej wyznaczenie od dowolnej wartości kąta φ . Przykładowo dla $\varphi \in \langle 2\pi, 4\pi \rangle$ z odstępem kątowym $\frac{\pi}{4}$ wartości promieni wodzących wyniosą:

$$\rho_{2\pi} = D, \quad \rho_{2\pi + \frac{\pi}{4}} = \frac{9}{8}D = 1,125D, \quad \rho_{2\pi + \frac{\pi}{2}} = \frac{5}{4}D = 1,25D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{3\pi}{4}} = \frac{11}{8}D = 1,375D, \quad \rho_{2\pi + \pi} = \frac{3}{2}D = 1,5D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{5\pi}{4}} = \frac{13}{8}D = 1,625D, \quad \rho_{2\pi + \frac{3\pi}{2}} = \frac{7}{4}D = 1,75D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{7\pi}{4}} = \frac{11}{8}D = 1,875D, \quad \rho_{4\pi} = 2D.$$

Rys. 7. Oznaczenie parametrów spirali Archimedes
Fig. 7. Designation of parameters of spiral of Archimedes

$$\rho_{2\pi} = D, \quad \rho_{2\pi + \frac{\pi}{4}} = \frac{9}{8}D = 1,125D, \quad \rho_{2\pi + \frac{\pi}{2}} = \frac{5}{4}D = 1,25D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{3\pi}{4}} = \frac{11}{8}D = 1,375D, \quad \rho_{2\pi + \pi} = \frac{3}{2}D = 1,5D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{5\pi}{4}} = \frac{13}{8}D = 1,625D, \quad \rho_{2\pi + \frac{3\pi}{2}} = \frac{7}{4}D = 1,75D,$$

$$\rho_{2\pi + \frac{7\pi}{4}} = \frac{11}{8}D = 1,875D, \quad \rho_{4\pi} = 2D.$$

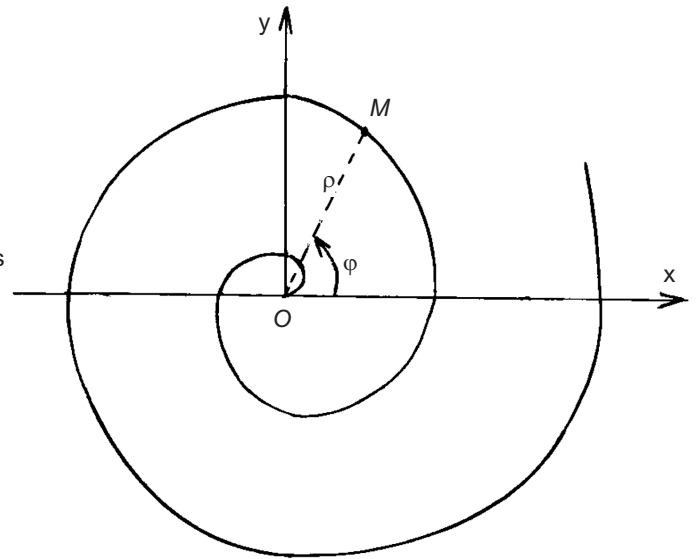
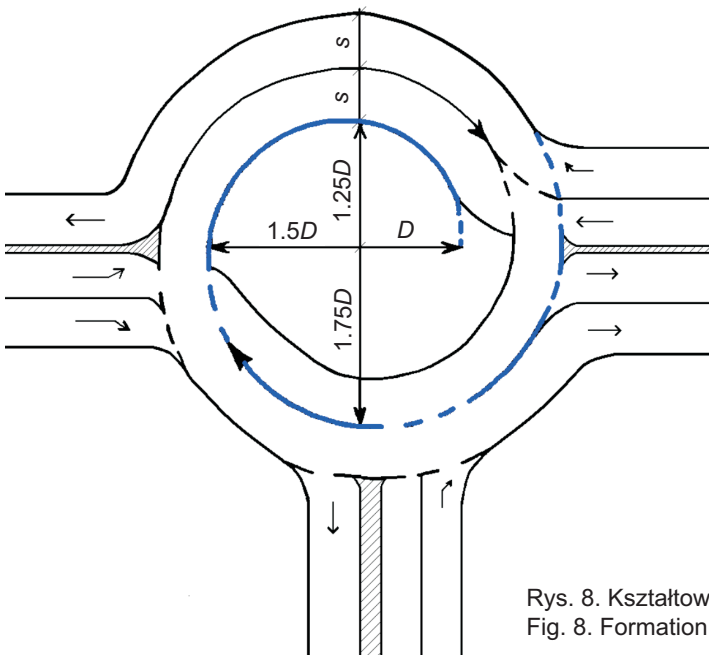


Fig. 8 shows the formation of a turbo-roundabout by using the spiral of Archimedes accordance with the above mentioned values. The axis of the assigned spiral, in relation to which the other traffic lanes were determined, is marked by the bold line.

Obviously, the presented conception of the use of the spiral of Archimedes in the formation of turbo-roundabouts requires further and deepened investigations leading to, for example, defining the circumstances in which the use of a turbo-roundabout is specifically justified due to the asymmetry of traffic intensity at the entrances. The shape of the central island depends also on the situational setting of entrances of the rebuilt crossroads. Area restrictions caused by e.g. existing buildings can also have a significant impact.



Rys. 8. Kształtowanie ronda turbinowego z wykorzystaniem spirali Archimedes
Fig. 8. Formation of a turbo-roundabout with the use of the spiral of Archimedes

Oczywistym jest, że przedstawiona propozycja wykorzystania spirali Archimedesesa do kształtowania ronda turbiniowego wymaga dalszych pogłębionych badań, np. określenia w jakich przypadkach występuje szczególna zasadność ich stosowania, wywołana asymetrią natężenia ruchu na wlotach. Kształt wyspy centralnej zależy także od rozmieszczenia sytuacyjnego wlotów przebudowywanego skrzyżowania. Nie bez znaczenia są niekiedy ograniczenia terenowe wywołane istniejącą zabudową itp.

6. PRZEPUSTOWOŚĆ RONDA TURBINOWEGO

Do przepustowości rond wykorzystuje się głównie metody empiryczne. Opierają się one na pomiarach przepustowości rond z jednym lub więcej wlotami, na których występuje natężenie nasycenia („nasycony wlot”). Pomiar te pozwalają wyznaczyć matematyczny związek pomiędzy natężeniem kolizyjności ruchu przed wlotem Q_{kw} [P/h] i przepustowością na wlocie C_{pw} [P/h]. Związek ten ulega różnym przekształceniom. Zgodnie z [11] postać tego związku jest następująca:

$$C_{pw} = \frac{1500 - \frac{8}{9}Q_{kw}}{\gamma}, \quad Q_{kw} = \beta \cdot Q_{ro} + \alpha \cdot Q_{or}, \quad (6)$$

gdzie:

Q_{ro} – natężenie ruchu okrężnego na wlocie [P/h],

Q_{or} – natężenie ruchu na wylocie z ronda [P/h],

α – współczynnik uwzględniający wpływ Q_{or} na Q_{ro} ,

β – współczynnik uwzględniający liczbę pasów ruchu na rondzie,

γ – współczynnik uwzględniający liczbę pasów ruchu na wlocie.

- Wartość współczynnika α zależy od odległości d [m] pomiędzy punktami kolizji dla potoków: wjeżdżającego i wyjeżdżającego z wlotu z potokiem ruchu kołowego na jezdni ronda liczonej po łuku koła. W przypadku wartości d rosnącej od 0 m do 21 m wartość współczynnika α maleje jednostajnie od wartości 0,6 do 0,1; w przypadku $d \in <12 m, 27 m>$ wartość współczynnika jest stała $\alpha = 0,1$; w przypadku $d = 28 m$: $\alpha = 0$.
- Wartość współczynnika β przyjmuje wartości: dla 1 pasa ruchu ronda $0,9 \leq \beta \leq 1,00$; dla 2 pasów ruchu ronda $0,6 \leq \beta \leq 0,8$; dla 3 pasów ruchu ronda $0,5 \leq \beta \leq 0,6$.

6. CAPACITY OF A TURBO-ROUNDA

The capacity of a roundabout is most often determined by using the empirical methods. These are based on measurements of the capacity of roundabouts with one or more entrances with saturation intensity (“saturated entrance”). These measurements enable the determination of the mathematical relation between the collision intensity that occurs before approaching the entrance Q_{kw} [P/h] and the capacity at the entrance C_{pw} [P/h]. This relation underwent various transformations. According to [11], its form is as follows:

$$C_{pw} = \frac{1500 - \frac{8}{9}Q_{kw}}{\gamma}, \quad Q_{kw} = \beta \cdot Q_{ro} + \alpha \cdot Q_{or}, \quad (6)$$

where:

Q_{ro} – intensity of the circulating traffic at the entrance [P/h],

Q_{or} – intensity of traffic at the roundabout exit [P/h],

α – the coefficient taking into consideration the influence of Q_{or} on Q_{ro} ,

β – the coefficient taking into consideration the number of traffic lanes on the roundabout,

γ – the coefficient taking into consideration the number of traffic lanes at the entrance.

- Value of the coefficient α depends on the distance d [m] between the points of conflict, regarding the entering/exiting traffic flow with the traffic flow circulating on the roundabout carriageway measured along the arc of a circle. For value d that increases from 0 m to 21 m, the value of the coefficient α decreases steadily from value 0.6 to 0.1, for $d \in <12 m, 27 m>$ the value of the coefficient is constant $\alpha = 0.1$, for $d = 28 m$: $\alpha = 0$.
- The value of coefficient β takes the values: for 1 the traffic lane of roundabout $0.9 \leq \beta \leq 1.00$; for 2 the traffic lanes of roundabout $0.6 \leq \beta \leq 0.8$; for 3 the traffic lanes of roundabout $0.5 \leq \beta \leq 0.6$.
- The value of coefficient γ take the values: for 1 the traffic lane at the entrance of roundabout $\gamma = 1.0$, for 2 the traffic lanes at the entrance of roundabout $0.6 \leq \gamma \leq 0.7$, for 3 the traffic lanes at the entrance of roundabout $\gamma = 0.5$.

The capacity can be defined as the sum of capacities at all entrances, with one saturated entrance, whereas the global capacity should be considered as the sum of capacities at all saturated entrances.

- Wartość współczynnika γ przyjmuje wartości: dla 1 pasa ruchu na wlocie ronda $\gamma = 1,0$; dla 2 pasów ruchu na wlocie ronda $0,6 \leq \gamma \leq 0,7$; dla 3 pasów ruchu na wlocie ronda $\gamma = 0,5$.

Przepustowość może być zdefiniowana jako suma przepustowości na wszystkich wlotach, przy jednym wlocie nasyconym, globalną przepustowość należy traktować jako sumę przepustowości na wszystkich wlotach nasyconych.

Do określenia przepustowości ronda turbinowego wykorzystano dwupasowe rondo turbinowe, na tarczy którego kierowcy nie mogą zmienić pasa ruchu, w przeciwieństwie do ronda klasycznego. Skalibrowany model symulacji ronda klasycznego pozwala na dokładne określenie przepustowości ronda turbinowego. Nie wnikając w szczegółowe struktury przepływu, okazało się, że ogólna przepustowość dwupasowego ronda turbinowego przekracza ogólną przepustowość klasycznego ronda trzypasowego o 12%, kiedy natężenie bocznych potoków ruchu jest bliskie zera, a o 20%, kiedy natężenie ruchu bocznych i głównych potoków ruchu są takie same. Konieczność korzystania z wewnętrznych pasów ruchu posiada duży wpływ na ogólną przepustowość ronda turbinowego. Na klasycznym kilkupasowym rondzie zewnętrzny pas jest bardziej atrakcyjny niż pasy wewnętrzne. Na rondzie turbinowym nie ma miejsc przeplatania, a pasy wewnętrzne wykorzystywane są bardziej efektywnie, znika zatem niepewność pojawiająca się przy zmianach pasa ruchu, co wpływa na większą przepustowość tych rond.

7. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Ronda turbinowe są nowym rozwiązaniem, które posiada wiele zalet w stosunku do powszechnie funkcjonujących rond kołowych. Ronda te mogą więc stanowić w projektowaniu uzupełnienie istniejącej oferty rond kołowych. Podstawową zaletą rond turbinowych jest przede wszystkim znacznie większa sprawność ruchu. Brak przeplatania na tarczy ronda powoduje, że jego przepustowość jest większa o 12% do 20% w porównaniu z klasycznym rondem kołowym. Ronda turbinowe kształtowane za pomocą elipsy poszerzają ofertę projektową, szczególnie dla skrzyżowań o nierównomiernym rozkładzie natężeń i dość zróżnicowanej strukturze kierunkowej. Ocena warunków ruchu, a także próba zdefiniowania matematycznych zależności opisujących ruch na rondzie kształtowanym elipsą wymaga przeprowadzenia wielu badań empirycznych. Na obecnym etapie rozważań można przypuszczać, że przepustowość rond kształtowanych przy użyciu elipsy będzie nieznacznie większa niż kołowych

The capacity of a turbo-roundabout was determined by using a two-lane turbo-roundabout with circulating lanes on which drivers, in contrast with a standard roundabout, cannot change the traffic lane. The calibrated model for the standard roundabout simulation enables the exact determination of a turbo-roundabout. Without going into details of the specific capacity structures, it appeared that the total capacity of a two-lane turbo-roundabout exceeds the total capacity of a three-lane standard roundabout by 12% in case where the intensity of the side flow is close to zero, and by 20%, in case where the intensity of both, the side and the main flows, are the same. The total capacity of a turbo-roundabout is influenced by the necessity of using the interior traffic lanes. Within a standard multi-lane roundabout, the exterior lane is more attractive than the interior lanes. A turbo-roundabout does not have weaving sections and the interior lanes are used more efficiently, therefore there is no uncertainty, which occurs while changing the traffic lanes and it results in the higher capacity of these roundabouts.

7. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

Turbo-roundabouts are a new solution that has many advantages in comparison with the commonly functioning circular roundabouts. Therefore these roundabouts can constitute a supplement to the designing of the existing circular roundabouts. The basic advantage of turbo-roundabouts is primarily the considerably greater traffic performance. The absence of a weaving movement on the circulating lanes causes that the capacity of these roundabouts is increased by 12% to 20% in comparison with standard circular roundabouts. Turbo-roundabouts, shaped by using an ellipse, broaden the choice of design, regarding particularly the crossroads with an unequal distribution of intensities and sufficiently diversified direction structure. Assessment of traffic conditions, as well as an attempt to define the mathematical relation describing traffic on a roundabout shaped by an ellipse, requires a lot of empirical investigations. At the current stage of discussion, it can be assumed that the capacity of roundabouts formed by use of an ellipse will be slightly higher than the capacity of the circle turbo-roundabouts. This will depend mainly on the size of the traffic intensity disproportions on its two main directions. Geometrical formation of a turbo-roundabout can be conducted with the use of the spiral of Archimedes, particularly, in cases when asymmetrical arrangement of the roundabout is more advisable.

rond turbinowych. Zależec to będzie głównie od wielkości dysproporcji natężenia ruchu na jego dwóch głównych kierunkach. Do kształtowania geometrycznego ronda turbinowego można wykorzystać spiralę Archimedes, szczególnie gdy wskazany jest asymetryczny układ ronda.

Należy zaznaczyć, że w literaturze zagranicznej proponuje się różnorodne kształty wyspy centralnej, np. jajowate, spiralne, „kolanowe” (kształt kolana poziomo ułożonej nogi) itd. Przedstawione kształty odpowiadają kolejno: elipsie, spirali Archimedes, i kardiodzie [7]. Głównymi czynnikami decydującymi o wyborze typu ronda są: poziom nasycenia ruchu, średni czas opóźnień, wymagania przestrzenne i koszty związane z realizacją inwestycji.

Ronda turbinowe są nową formą kształtowania skrzyżowania, pozwalającą na zwiększenie przepustowości przy zachowaniu bezpieczeństwa zbliżonego do rond jednopasmowych. Z tego względu wprowadzenie tej propozycji, szczególnie w początkowym okresie, wymaga edukacji użytkowników i uwzględnienia jej w szkoleniu kierowców. Należy zaznaczyć, że w ostatnim okresie projektanci wykazują duże zainteresowanie nową formą skrzyżowań, co niekiedy znajduje urzeczywistnienie w praktyce. Szczególną uwagę należy zwrócić na dobre oznakowanie omawianych rond, tak aby kierowca w momencie dojeżdżania do skrzyżowania miał już obrany właściwy dla siebie pas ruchu. Z tego powodu przed dojazdem do skrzyżowania powinno znaleźć się nie tylko oznakowanie na jezdni, ale także oznakowanie pionowe. Czasami można spotkać, wzorowane na rondach turbinowych, oznakowanie pasów ruchu na istniejących rondach kołowych. Brak wcześniejszej sygnalizacji powoduje dezorientację kierowców, skutkującą przekraczaniem linii ciągłej. Przede wszystkim dotyczy to kierowców, którzy na tego typu rondzie znaleźli się po raz pierwszy.

Do projektowania rond turbinowych powinny zostać opracowane nowe wytyczne, które ułatwiłyby projektantom praktyczną realizację takich skrzyżowań. Wydaje się, że opracowanie pomocy do projektowania rozwiązań w formie krzywków czy opracowań numerycznych byłoby szczególnie pomocne.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Christopher S., Kinzel P.E.*: Singing and pavement-marking strategies of multilane roundabouts. An informal investigation. Urban Street Symposium, Kansas City, July 2003
http://www.urbanstreet.info/2nd_sym_proceedings/Volume%202/Kinzel.pdf

It should be noted that foreign literature suggests various shapes of the central island, e.g. oval, spiral, “knee” (the shape of a knee in horizontally arranged leg), etc. These shapes successively correspond to an ellipse, the spiral of Archimedes and the cardioid [7]. The main factors determining the choice of a roundabout are: the level of the traffic saturation, the average length of delay, space requirements and costs associated with the implementation of the investment.

Turbo-roundabouts constitute a new style of intersections formation, which allows the capacity expansion while maintaining the safety similar to the one which characterizes one-lane roundabouts. For this reason, implementation of this proposal, particularly in the initial period, requires more educational activities for the users and should be incorporated in the driver training. It ought to be noted that in recent years designers have shown a great interest in this new form of intersections and it is occasionally put into practice. Particular attention should be paid to proficient marking, which allows drivers to choose the appropriate traffic lane before approaching the intersection. For this reason, both the carriageway marking and the traffic signing should be placed before the approach to an intersection. Sometimes, on the existing traffic roundabouts, there is a road marking modeled on the turbo-roundabouts. The absence of traffic signals prior to the entrance may confuse drivers, resulting in a continuous line crossing. It refers mainly to the drivers who encounter this type of a roundabout for the first time.

New guidelines of turbo-roundabouts should be developed to facilitate designers the practical implementation of such intersections. It seems that elaborating an assistance project in order to support designing this kind of solutions in the form of the French curves or numerical studies would be particularly helpful.

- [2] *Fortuijn L.G.H.*: Pedestrian and bicycle-friendly roundabouts. Dilemma of comfort and safety. Presented at the Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers (ITE), Seattle, Washington (USA), 2003
<http://www.mnt.ee/failid/SlowTrRoundb.pdf>
- [3] *Fortuijn L.G.H., Carton P.J.*: Turbo Circuits. A well-tired concept in a new guise (opracowanie niepublikowane)
- [4] *Fortuijn L.G.H.*: Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen (opracowanie niepublikowane)

- [5] *Głębocka M.M.*: Koncepcja geometrii skrzyżowań z wykorzystaniem rond. Praca magisterska. Politechnika Białostocka, 2007
- [6] *Grabowski R.J.*: Kształtowanie rond turbinowych za pomocą elipsy. *Drogownictwo*, **LXIII**, 10, 2008, 339 - 342
- [7] *Grabowski R.J.*: Geometrical shaping of the turbo-circuits. *Reports on Geodesy. University of Technology*, **87**, 2, 2009, 137 - 144
- [8] *Mieszkowski P.*: Ronda turbinowe. *Drogownictwo*, **LXII**, 4, 2007, 129 - 131
- [9] *Żurowska J.*: Projektowanie rond – doświadczenia i nowe tendencje. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Materiały konferencyjne*, **151**, 92, 2010
- [10] *Tracz M., Chodur J., Gaca S.*: Wytoczne projektowania skrzyżowań drogowych. Część 2 - Ronda. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Ekodroga, Kraków, 2001
- [11] *Nissens H., Welvaert G.*: Methods to assess the capacity of roundabouts (in Dutch). Gent, 1998
- [12] *Tracz M., Splawińska M., Saktak W.*: Bezpieczeństwo ruchu na rondach dwupasmowych. *Transport Miejski i Regionalny*, **2**, 2005, 18 - 22